

DEPARTEMENT D'ÉCOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

Laboratoire de

N°/SNV/2020

THÈSE

Présentée par

Kenza GARAH

Pour l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière: Sciences Biologiques

Spécialité: écosystèmes méditerranéens et géomatique appliquée

THÈME

RÉPONSE DU PIN D'ALEP (*PINUS HALEPENSIS* MILL.) AUX
CHANGEMENTS CLIMATIQUES RÉCENTS DANS LA RÉGION DES
AURÈS : QUANTIFICATION ET SPATIALISATION PAR LES
APPROCHES DENDROCHRONOLOGIQUE ET GÉOMATIQUE

Soutenue publiquement le : 08/06/2020

DEVANT LE JURY

Président	Mr. SI BACHIR Abdelkrim	Pr. <u>Université de Batna 2</u>
Rapporteur	Mr. BENTOUATI Abdallah	Pr. <u>Université de Batna 1</u>
Co-rapporteur	Mr. RABHI Khellaf	MCA. <u>Université de Tizi Ouzou</u>
Examineurs	Mr. BERTTELLA Nabil	MCA. <u>Université de Batna 2</u>
	Mr. CHAFAA Smail	MCA. <u>Université de Batna 2</u>
	Mr. MALKI Hamana	MCA. <u>Université de Batna 1</u>

Année universitaire : 2019/2020



Dédicace

Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu.

Avec l'expression de mes sincères sentiments de gratitude, de reconnaissance, de respect et d'amour, je dédie cette thèse ;

Aux meilleurs parents au monde, ceux qui m'ont protégé et soutenu depuis mon premier cri de vie, ceux qui constitue la première école de mon existence, ceux qui ont fait de mon éducation, mon instruction, ma formation et mon bien-être une préoccupation, et qui depuis ma tendre enfance n'ont cessé de lutter pour m'offrir les conditions propices à ma réussite ; ceux qui je dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain ; à **ma mère « Mamika »** et à **mon père Mohamed**. Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'étude et d'apprentissage, de longs mois de sacrifices et de peine, de longs jours et nuits d'encouragement et de prière.

Rien au monde ne vaut vos efforts fournis, en ce jour, j'espère réaliser l'un de vos rêves. J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi.

À l'homme de ma vie ; celui qui depuis que j'ai connu n'a cessé de me soutenir et de m'encourager, celui qui a su être à mes côtés durant les moments les plus pénibles et qui a fait l'impossible pour me remonter le moral, l'homme compréhensif qui a su supporter mes sautes d'humeur et qui m'a voulu toujours le meilleur ; à **mon mari « Salaheddine BOUCHAMA »**. Que Dieu protège notre amour et nous aide à réaliser tous nos rêves partagés.

Aux plus respectueux, beaux et adorables frères au monde ; ceux qui m'ont procuré un amour fraternel, ceux qui n'ont cessé de me soutenir et de m'épauler ; à **mes très chers frères Amir et Ahmed Rami**. Que Dieu illumine vos chemins.

À celle qui a partagé avec moi mon enfance avec ses meilleurs et ses plus agréables moments ; à **ma très chère sœur Rania** et **son mari IDIRS BEGHAMI**. *Que l'avenir vous réserve tout le bonheur et la réussite.*

À ceux qui m'ont accueilli à bras ouverts dans leur famille, ceux qui m'ont considéré comme étant leur propre fille, ceux qui m'ont soutenu et conseillé ; à **mes très chers beaux-parents ; ma belle-mère « Akkola » et mon beau père Ali.** *Que Dieu vous bénisse.*

À ceux qui me respect comme étant leur grande sœur, ceux qui avec leur spontanéité me sont entourés d'une ambiance joyeuse, à mes adorables ; **belle-sœur Malak et beau-frère Nadjib.**

À toute ma famille ; ma grande mère paternelle, mes tantes, mes oncles, mes cousines et cousins.

À celles qui ont été à mes coté durant les moments les plus difficiles, les moments de doutes et de déceptions, à mes amies **Ikram DERRADJI et Nadia KHATER.** *Que dieu protège notre belle amitié.*

Spéciale dédicace à l'école nationale des forêts ENAF – Batna, le seul établissement de sa nature à l'échelle nationale, mon berceau d'expérience professionnelle.

À tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

Cette thèse et moi vous devons beaucoup. Merci.

Kenza GARAH

Remerciements



Je tiens d'abord et en tout premier lieu à offrir mes plus sincères et chaleureux remerciements à mon directeur de thèse; **Monsieur Abdallah BENTOUATI ; Professeur à l'université de Batna 1**. Merci pour la confiance, le soutien et les conseils que vous m'avez prodigués tout au long de mon parcours de recherche doctorale. Merci pour votre patience, gentillesse et disponibilité. Merci pour vos critiques constructives. Merci pour l'autonomie que vous m'avez laissée. Merci pour vos encouragements qui m'ont permis de finir ce travail «*presque fini depuis longtemps*». J'ai eu un immense plaisir de travailler avec vous monsieur.

Je n'arrive pas à trouver de mots suffisamment forts pour exprimer la reconnaissance que j'ai à l'égard de **Monsieur Raul Sanchez-Salguero Professeur à l'université Pablo de Olavide-Sevilla** en Espagne, pour ça codirection de ce travail au cours des premières années d'inscription doctorale. Merci de m'avoir accueilli dans votre laboratoire au sein de l'université Pablo de Olavide-Sevilla, pour travailler sur mes échantillons de dendrochronologie, merci pour les précieux conseils et orientations.

Mes remerciements vont également à l'égard de **Monsieur Khellaf RABHI; maitre de conférence A** à l'université de Tizi Ouzou, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la codirection de la présente thèse dans des circonstances particulièrement difficiles. Je vous remercie très sincèrement.

Je suis très honoré à remercier de la présence à mon jury de thèse et je tiens à remercier :

Monsieur Abdelkrim SI BACHIR; Professeur à l'université de Batna 2 pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse. Je tiens à l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Messieurs; Nabil BERTELLA «Maitre de conférence A à l'université de Batna 2», Smail CHAFAA «Maitre de conférence A à l'université de Batna 2» et Hammana MALKI «Maitre de conférence A à l'université de Batna 1», qui ont bien voulu participer au jury de thèse en qualité d'examineurs. Je vous assure de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail ainsi que pour le temps que vous avez consacré à lire ce manuscrit et d'y porté un regard critique.

Je voudrais remercier mes collègues forestiers travaillant à la conservation de Khenchela, je m'adresse particulièrement à messieurs : **Bachir BAHRI**, **Ammar MENACERI**, **Youcef KHELLOTE**, **Boumediene BOUZEKRI** et **Abdelkrim BELKOUM**, pour leur aide qui m'a été indispensable dans la phase d'échantillonnage sur terrain.

Je tiens à remercier également les cadres de l'école nationale des forêts_ENAF-Batna, pour leur soutien et leurs encouragements permanents plus particulièrement Monsieur le **directeur Athmane BRIKI**, et surtout mes amis et collègues formateurs avec qui nous avons eu des discussions fructueuses. Un Grand merci l'équipe, avec mes sincères vœux de réussite.

Par la même occasion, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants qui ont marqué mon parcours scolaire, du centre culturel et islamique de la wilaya de Batna à l'université, notamment les forestiers de l'institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, ainsi que les biologistes de la faculté des sciences de la nature et de la vie des universités de Batna 1 et 2.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes, qui de manière directe ou indirecte, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.



TABLE DES

MATIERES

TABLE DES MATIERES

ملخص

Abstract

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE	Page 21
-----------------------	------------

Chapitre I : Contexte physique et biotique de la région d'étude

1. Considérations générales sur les Aurès et la zone d'étude.....	26
2. Localisation géographique de la zone d'étude.....	28
3. Aperçu général sur la végétation de la zone d'étude.....	29
4. Cadre géomorphologique.....	30
5. Cadre géologique et pédologique.....	33
6. Cadre hydrographique.....	35

Chapitre II : Caractérisation climatique de la région des Aurès

Introduction.....	38
Matériel et méthodes.....	38
Résultats et discussion.....	41
1. Les précipitations.....	41
1.1. Données classiques.....	41
1.2. Données spatialisées.....	49
2. Les Températures.....	51
2.1. Données classiques.....	51
2.2. Données spatialisées.....	54
3. Synthèse climatique.....	57
3.1. Données classiques.....	58
<i>Indice xérothermique de Bagnouls et Gaussen</i>	58
3.2. Données spatialisées.....	59
<i>Nombre de mois secs</i>	59
<i>Indice de Bagnouls et Gaussen</i>	60
<i>Indice d'aridité de De Martonne</i>	62
<i>Bilan hydrique annuel P-ETP</i>	64
Conclusion.....	65

Chapitre III : Caractérisation dendrométrique et dendrochronologique du pin d'Alep Aurasien

Introduction.....	68
Matériel et méthodes.....	69
1. Stratégie d'échantillonnage et acquisition de données.....	69
2. Analyse de données.....	72
2.1. Les variables dendrométriques transformées.....	72
2.2. Les variables dendrochronologiques.....	74
2.3. Etablissement des chronologies.....	76
2.4. Evaluation de l'impact des changements climatiques sur la croissance radiale.....	76
3. Données climatiques.....	77
Résultats et discussion.....	77
1. Contexte écologique de l'échantillonnage.....	77
2. Caractérisation dendrométrique du pin d'Alep de l'Aurès oriental.....	78
2.1. Structure du peuplement.....	78
2.1.1. Structure globale.....	80
2.2. Analyse descriptive Paramètres statistiques des variables dendrométriques du peuplement.....	80
3. Caractérisation dendrochronologique du pin d'Alep de l'Aurès oriental.....	83
3.1. Analyse descriptive des paramètres dendrochronologiques du peuplement.....	83

3.2. Les années caractéristiques.....	84
3.3. Chronologies obtenues.....	87
3.4. Influence des changements climatiques récents sur le pin d'Alep de l'Aurès oriental.....	90
3.4.1. Relation croissance/climat.....	90
3.4.2. Fonction de réponse.....	93
Conclusion.....	96
CHAPITRE IV : Evolution spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental	
Introduction.....	98
Zone d'étude.....	99
Matériel et méthodes.....	101
Résultats et discussion.....	103
1. Massif des Beni Imloul.....	103
2. Massif de Ouled Yagoub.....	106
3. Récapitulatif.....	110
Conclusion.....	111
Chapitre V : Caractérisation spectrale des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental et leur dynamique	
Introduction.....	113
Matériel et méthodes.....	114
Résultats et discussion.....	118
1. Les indices bruts.....	118
1.1. statistiques descriptives des indices spectraux.....	118
1.2. Classification des valeurs des indices et leur signification.....	126
2. Evolution spatiotemporelle des valeurs d'indices dans la zone d'étude.....	135
Conclusion.....	144
Chapitre VI : Modélisation de la distribution actuelle et potentielle du pin d'Alep dans la région des Aurès	
Introduction.....	146
Matériel et méthodes.....	147
Résultats et discussion.....	150
<i>Évaluation et validation des modèles</i>	150
<i>Contribution des variables environnementales aux modèles</i>	151
<i>Élaboration des modèles</i>	155
Conclusion.....	164
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	166
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
RÉSUMÉ	

ملخص

ملخص

في طي التغييرات المناخية الأخيرة، يهدف هذا العمل إلى كشف و تقييم و تفسير محصلات تقلبات امتغيرات المناخية على النظم الإيكولوجية الغابية (المكونة من الصنوبر الحلبي) الواقعة في منطقة الأوراس الواقعة شمال شرق الجزائر، كما يولى اهتمام خاص للصنوبر الحلبي و ذلك لكونه النوع الغابي الرئيسي للبلاد.

عدة مقاربات علمية استعملت لهذا الغرض لتحليل الحالة الماضية و الحالية للتشكيلات النباتية من خلال خصائصها الحراجية و الطيفية. وشرح دينامياتها المكانية و الزمانية من خلال التغييرات في استخدام الأراضي، فضلا عن نمذجة التوزيع المكاني المحتمل الحالي والمستقبل لغابات الصنوبر (الحراجة، البيئة، وقياس الديندرومتري، وعلم الدوندرولوجيا، الاستشعار عن بعد، ونظم المعلومات الجغرافية، إلخ).

وقد بينت نتائج هذا التحليل أن غابات الصنوبر الأوراسية تمتلك إمكانات نمو كبيرة، تطور النمو الشعاعي لصنوبر حلب و توزيعه المكاني في منطقة الأوراس يميل إلى التدهور في ظل الظروف المناخية التي أصبحت قاسية على نحو متزايد.

وقد أثر الانحدار تحديدا على الجزء الجنوبي من المنطقة، الذي يتعرض بالفعل للتأثيرات الصحراوية، وسيؤثر على هذه المناطق أكثر من ذلك وفقا لتوقعات التوقعات المناخية لعام 2055 و عام 2085.

وبالتالي فإن النتائج التي تم الحصول عليها تمثل عنصرا أساسيا في التنبؤ بالمخاطر وتكييف استراتيجية ملائمة لحماية أنواع أشجار الغابات.

الخطط الدالة: الصنوبر الحلبي، الأورس، الدندرولوجيا، النمذجة، الجيوماتيك، التطور، تغير

المناخ



ABSTRACT

Abstract

In the context of recent climate change, the present work aims at revealing, evaluating and explaining the consequences of the fluctuations of climatic variables on the forest ecosystems (Aleppo pine) located in the region of Aures in the north-east of Algeria. pine of Aleppo by the fact that it presents the major forest essence of the country.

Various scientific approaches are used for this purpose to analyze the past and current state of plant formations through their dendrological and spectral characteristics, explain their spatiotemporal dynamics through changes in land use, as well as modeling the potential current and future spatial distribution of pine forests (Forestry, ecology, dendrometry , dendrochronology, climatology, remote sensing, and geographic information systems, etc.)

The conclusions of this analysis revealed that the aurasian pine forest has considerable growth potential. the interannual evolution of the Aleppo pine radial growth also its spatial distribution tend to decline in the Aurès region, in a context of climatic conditions that have become increasingly harsh. The regression has precisely affected the southern part of the region, already exposed to Saharan influences, and it would affect these areas even more according to the projections of the climate projections for the year 2055 and the year 2085.

The results obtained thus represent a key element in the prediction of risk and the adaptation of an appropriate strategy for the protection of forest tree species.

Key words: Aleppo pine, Aurès, dendrochronology, modeling, geomatics, evolution, climate change



LISTE DES

FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1. Carte de situation administrative de la région des Aurès.	26
Figure 2. Carte de modèle numérique de terrain de la partie orientale de l'Algérie (région des Aurès).	27
Figure 3. Carte de situation de la région des Aurès et des massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul.	28
Figure 4. Carte des altitudes des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.	31
Figure 5. Carte des pentes des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.	31
Figure 6. Carte des expositions des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.	33
Figure 7. Carte des formations géologiques des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.	34
Figure 8. Carte des sols des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.	35
Figure 9. Carte de réseau hydrographique de la région des Aurès.	36
Figure 10. Carte de distribution spatiale des stations météorologiques de référence.	40
Figure 11. Variations mensuelles des hauteurs des précipitations des stations de référence.	43
Figure 12. Répartition saisonnière moyenne des précipitations dans les Aurès.	44
Figure 13. Présentation diachronique des précipitations de la station de Batna.	46
Figure 14. Evolution temporelle des précipitations de la région des Aurès.	46
Figure 15. Observations inter annuelles des hauteurs pluviométriques des Aurès.	47
Figure 16. Carte de distribution spatiale des hauteurs des précipitations annuelles de la région des Aurès.	49
Figure 17. Carte de distribution spatiale des hauteurs des précipitations saisonnières de la région des Aurès.	51
Figure 18. Evolution de la température de la station météorologique de Batna.	53
Figure 19. Evolution interannuelle de la température moyenne, minimale et maximale.	54
Figure 20. Carte de distribution spatiale des températures moyennes de la région des Aurès.	55
Figure 21. Carte de distribution spatiale des températures minimales de la région des Aurès.	56
Figure 22. Carte de distribution spatiale des températures maximales de la région des Aurès.	56
Figure 23. Cartes d'évolution spatiale et saisonnière des températures moyennes de la région des Aurès.	57
Figure 24. Diagrammes ombrothermiques de la station de Batna pour les périodes (1953/1983) et (1984/2014).	58
Figure 25. Carte du nombre de mois secs de la région des Aurès.	59
Figure 26. Carte d'indice de Bagnouls et Gaussen simplifié de la région des Aurès.	61
Figure 27. Carte d'indice d'aridité de De Martonne de la région des Aurès.	63
Figure 28. Carte du bilan hydrique annuel de la région des Aurès.	65

Figure 29. Présentation graphique des pinèdes de la région d'étude.	79
Figure 30. Structure des peuplements par site d'échantillonnage.	80
Figure 31. Présentation graphique des années caractéristiques « à partir du fichier de sortie du programme R ».	85
Figure 32. Courbe des épaisseurs brutes des cernes de croissance du pin d'Alep de l'Aurès oriental.	88
Figure 33. Courbe de l'évolution de la croissance radiale de pin d'Alep de l'Aurès oriental en fonction de l'âge.	88
Figure 34. Chronologie résiduelle du pin d'Alep de la région de l'Aurès oriental.	89
Figure 35. Moyenne mobile des indices de croissance de 20 ans décalés d'une année.	90
Figure 36. Relation indice de croissance – précipitations annuelles.	91
Figure 37. Relation années caractéristiques – précipitations annuelles.	91
Figure 38. Relation années caractéristiques – températures.	92
Figure 39. Carte de situation de la zone d'étude.	99
Figure 40. Carte des altitudes de la zone d'étude.	100
Figure 41. Organigramme de la démarche méthodologique.	101
Figure 42. Carte d'occupation du sol du massif des Beni Imloul en 1987.	104
Figure 43. Carte d'occupation du sol du massif de Beni Imloul en 2014.	104
Figure 44. Carte des zones touchées par le feu dans la wilaya de Khenchela durant l'été 2012 (ASAL, 2013).	105
Figure 45. Carte d'occupation du sol du massif de Ouled Yagoub en 1987.	108
Figure 46. Carte d'occupation du sol du massif de de Ouled Yagoub en 2014.	108
Figure 47. Organigramme de la démarche méthodologique.	118
Figure 48. Histogrammes des valeurs moyennes des indices NDVI, NDWI et GNDVI.	121
Figure 49. Histogramme des valeurs moyennes de l'indice SR.	121
Figure 50. Histogramme des valeurs moyennes des indices des feux de forêt.	122
Figure 51. Histogrammes des valeurs extrêmes des signatures spectrales du massif de Ouled Yagoub.	123
Figure 52. Histogrammes des valeurs extrêmes des signatures spectrales du massif des Beni Imloul.	124
Figure 53. Carte des changements du NDVI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	136
Figure 54. Carte des changements du GNDVI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	137
Figure 55. Carte des changements du NDWI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	138
Figure 56. Carte des changements du SR détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	139
Figure 57. Carte des changements du NBR détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	140
Figure 58. Carte des changements du BAI détectés pour les massifs de Ouled	141

Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	
Figure 59. Courbes de la valeur moyenne de l'AUC sous l'aire de la Courbe Caractéristique d'Opération ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>) du modèle de distribution actuelle et potentielle du pin d'Alep de la région des Aurès.	152
Figure 60. Importance relative de différentes variables environnementales en fonction des résultats de test <i>Jackknife</i> pour un gain de pin d'Alep.	153
Figure 61. Carte de distribution géographique actuelle du pin d'Alep de la région des Aurès.	158
Figure 62. Cartes de sensibilité du pin d'Alep de la région des Aurès aux changements climatiques (horizon 2055).	162
Figure 63. Cartes de sensibilité du pin d'Alep de la région des Aurès aux changements climatiques (horizon 2085).	163



**LISTE DES
TABLEAUX**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 1. Profil topographique de la zone d'étude.	30
Tableau 2. Description géographique et administrative des stations météorologiques prises pour l'étude.	39
Tableau 3. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la région des Aurès.	42
Tableau 4. Régime pluviométrique saisonnier et taux des pluies des stations de référence.	44
Tableau 5. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Batna.	45
Tableau 6. Variations annuelles des précipitations pour la période (1970-2014).	48
Tableau 7. Récapitulatif des statistiques de la table attributaire des précipitations annuelles.	50
Tableau 8. Températures moyennes, minimales, maximales et l'amplitude thermique de la station de Batna.	52
Tableau 9. Récapitulatif des principaux paramètres statistiques des variables thermiques de la région d'étude.	54
Tableau 10. Quantification de la répartition spatiale du nombre de mois secs de la région des Aurès.	60
Tableau 11. Classification de l'indice Bagnouls et Gausсен simplifié de la région des Aurès.	61
Tableau 1. Classification de l'indice d'aridité de De Martonne de la région des Aurès.	63
Tableau 13. Caractérisation écologique des placettes d'échantillonnage.	78
Tableau 14. Paramètres statistiques des variables mesurées au sein des placettes à Ouled yagoub.	80
Tableau 15. Paramètres statistiques des variables mesurées au sein des placettes à Beni Imloul.	81
Tableau 16. Paramètres statistiques des variables calculées au sein des placettes à Ouled Yagoub.	82
Tableau 17. Paramètres statistiques des variables calculées au sein des placettes à Beni Imloul.	82
Tableau 18. Principaux paramètres statistiques et dendrochronologiques du pin d'Alep de l'Aurès oriental.	84
Tableau 19. Années caractéristiques observées pour le pin d'Alep de l'Aurès oriental « à partir du fichier de sortie du programme R ».	86
Tableau 20. Bilan des variables climatiques corrélées aux indices de croissance du pin d'Alep de l'Aurès oriental.	92
Tableau 21. Résultats de la fonction de réponse de la croissance du pin d'Alep aux précipitations (<i>Dendroclim</i> , 2002).	93
Tableau 22. Classes des pentes de la zone d'étude.	100
Tableau 23. Caractéristiques des images satellitaires utilisées.	102
Tableau 24. Dynamique spatio-temporelle du massif des Beni Imloul entre 1987 et 2014.	103
Tableau 25. Dynamique spatio-temporelle du massif de Ouled Yagoub entre 1987 et 2014.	107
Tableau 26. Caractéristiques des images satellitaires utilisées.	115

Tableau 27. Présentation des indices utilisés.	116
Tableau 28. Récapitulatif des statistiques descriptives des signatures spectrales multi temporelles du massif de Ouled Yagoub.	119
Tableau 29. Récapitulatif des statistiques descriptives des signatures spectrales du massif des Beni Imloul.	120
Tableau 30. Les variables environnementales utilisées pour la modélisation du pin d'Alep des Aurès.	149
Tableau 31. Estimations des contributions relatives des variables environnementales aux modèles <i>MaxEnt</i> .	154
Tableau 32. Seuils logistiques des modèles de distribution de pin d'Alep de la région des Aurès.	156
Tableau 33. Distribution spatiotemporelle du pin d'Alep de la région des Aurès.	156
Tableau 34. Dynamique spatiotemporelle des zones de présence potentielle de pin d'Alep.	157



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les écosystèmes forestiers subissent constamment des variations de structures et de physiologie. Ces variations sont à l'origine des fluctuations climatiques cycliques d'amplitudes importantes avec des alternances régulières de réchauffements et de refroidissements. Ainsi, un couvert végétal peut passer d'un état de steppe vers celle de forêt plus ou moins dense et vice-versa (Vennetier, 2012). Cette dynamique entraînera un déplacement et un décalage plus ou moins important des aires potentielles des espèces forestières. Ce changement de température devrait entraîner un nouveau changement majeur de la composition des forêts dans de nombreuses régions du monde. Celui-ci semble plus rapide et dû principalement aux activités humaines par le rejet des gaz à effet de serre.

Le rapport de synthèse du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat) de 2014 a annoncé que la terre s'est réchauffée en moyenne de 0,6 à 0,7 °C depuis 1861 et que ce réchauffement a tendance à augmenter pour arriver entre 1,4 et 5,8 ° en l'an 2100 (Acot, 2008 ; Blondel, 2008). Il est très probable que la fréquence et la durée des vagues de chaleur augmenteront et que les précipitations extrêmes vont devenir plus intenses et plus fréquentes dans de nombreuses régions. Ainsi, vers la fin du 21^e siècle, le réchauffement moyen à la surface du globe par rapport à la période 1850–1900 sera probablement supérieur à 1,5 °C selon les scénarios optimistes et supérieurs à 2 °C selon les scénarios les plus pessimistes.

Par le fait de son ampleur et de sa rapidité, le changement climatique récent et ses répercussions potentielles occupent une place importante dans la recherche actuelle d'autant qu'il présente une curiosité scientifique et une question environnementale, qui mérite une attention particulière en matière de conservation des ressources forestières, étant donné que cette évolution se produit dans un délai inférieur à la durée de vie de la plupart des espèces forestières, et qu'il y a de plus en plus d'évidence qu'elle aura une incidence sur la composition et la répartition géographique des espèces de la forêt dans différentes régions dans le monde.

L'impact de ces changements sur la végétation est largement étudié par la communauté scientifique (Hughes, 2000 ; Keller *et al.*, 2000 ; Bréda *et al.*, 2006 ; Parmesan, 2006 ; Lebourgeois *et al.*, 2010 ; Vennetier, 2012).

Dans ce contexte, la région méditerranéenne connaîtra très probablement une élévation de la température estivale et une diminution des précipitations et la fréquence de périodes sèches pourrait s'accroître (Rambal et Hoff, 1998).

Les résultats des recherches à l'échelle du globe montrent que la région méditerranéenne ; qui est déjà soumise à de fortes contraintes climatiques pendant l'été surtout où le manque d'eau et les fortes températures vont de pair serait particulièrement touchée par les perturbations liées aux changements climatiques. Ces changements provoqueraient une évolution dans les aires de répartition et la productivité des arbres forestiers, ainsi que le fonctionnement des écosystèmes. Par conséquent, les modifications concernant les aires de distribution potentielle et réelle des espèces forestières seront considérables (Demarteau *et al.*, 2007).

Du fait de leur appartenance géographique à la rive sud de la méditerranée, les écosystèmes forestiers algériens ne font pas l'exception et sont particulièrement sensibles aux changements climatiques récents. Surtout que les conclusions des projections climatiques régionales pour l'Afrique méditerranéenne prévoient un réchauffement au cours du 21^e siècle, avec une hausse des températures et une diminution des précipitations (Christensen *et al.*, 2007). De son côté Terink *et al.*, (2013) a estimé la diminution pluviométrique en Algérie de 5 à 15 % à l'horizon du 2050.

A l'instar de tous les pays méditerranéens, et malgré les contraintes naturelles et anthropiques qui les caractérisent, l'Algérie recèle des formations forestières très diversifiées, localisées principalement dans le nord du pays, et dominées principalement par le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) qui constitue un capital forestier majeur.

Les inventaires forestiers évaluant l'état de la superficie forestière au cours des 60 dernières années, montrent que les étendues occupées par le pin d'Alep varient de 800000 ha à 885000 ha et qui correspond à un taux d'occupation de 30 à 40 % d'environ des surfaces boisées (Boudy, 1952 ; Pardé, 1957 ; Nahal, 1962 ; Mezali, 2003 ; Daoui *et al.*, 2007).

D'après le GIEC (2014), il est très probable que la fréquence et la durée des vagues de chaleur augmenteront et que les précipitations extrêmes vont devenir plus intenses et plus fréquentes dans de nombreuses régions.

Les peuplements de pin d'Alep sont répartis en grands massifs, occupant une très large amplitude écologique. Il est localisé en grande partie à l'état naturel dans les régions de l'Est et du Centre du pays principalement sur les Atlas, tellien et saharien, où il colonise des étages bioclimatiques très contrastés, avec un optimum de croissance présenté essentiellement en semi-aride (Nahal, 1962 et 1986). Par ailleurs, la région des Aurès recèle les peuplements de pin d'Alep les plus importants du pays (Kadik, 1987 ; Quezel, 1986).

Plus encore, du fait qu'il offre des exigences écologiques très modestes pour des productivités faibles, mais acceptables, les grands projets de reboisements qui ont été lancés par l'état algérien depuis l'indépendance, pour lutter contre la désertification, ont été basés essentiellement sur le pin d'Alep. L'action majeure a été le « barrage vert » lancé dans les années 70 (Bensaïd, 1995). Selon les chiffres officiels de la Direction générale des forêts (DGF), 1 852 748 ha ont été reboisés durant la période de 1962 à 2013.

Le pin d'Alep constitue une essence pionnière des grands reboisements, du fait de sa grande plasticité et son tempérament robuste (Quezel, 1986), toutefois la réflexion sur la situation future du pin d'Alep dans un contexte de changements climatiques et leurs conséquences plutôt néfastes, estime qu'une tendance à la dégradation spécifique des peuplements de pin d'Alep implique une tendance à la disparition d'une partie considérable de la forêt algérienne dans son ensemble.

La question se pose donc de la capacité réelle des espèces forestières à accomplir un tel déplacement. Dans cette optique ; comment répond le pin d'Alep aux changements climatiques récents, actuels et futurs dans la région des Aurès, déjà caractérisée par ses particularités climatiques ?

Pour traiter cette problématique, nous avons fait appel à différentes approches scientifiques ; plus particulièrement, dendrométrie, dendrochronologique et géomatique. Ainsi, le présent travail s'inscrit dans un axe de recherche qui s'efforce de décrire et d'expliquer certains aspects de la réponse du pin d'Alep aux changements climatiques récents, actuels et futurs.

Pour mieux appréhender cette réponse, la présente thèse s'intéresse donc, d'expliquer la tendance de la croissance aussi bien radiale que spatiale de la pinède Aurásienne, en rapport avec les facteurs environnementaux, plus particulièrement les conditions climatiques régnautes.

La démarche de cette thèse est scindée en six chapitres ; le premier chapitre consiste à une présentation du contexte physique et biotique de la région d'étude, le deuxième chapitre présente une caractérisation climatique et bioclimatique de la région des Aurès, le troisième chapitre expose une caractérisation dendrométrique et dendrochronologique du pin d'Alep Aurásien, le quatrième chapitre est relatif à l'étude de l'évolution spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental, le cinquième chapitre correspond à une caractérisation spectrale des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental et

INTRODUCTION GENERALE

leur dynamique. Et enfin, le sixième chapitre de la modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès.

Le but de cette organisation est de décliner progressivement les différents aspects de la problématique générale de ce présent travail, de manière à obtenir un résultat dans un chapitre et de l'utiliser et l'intégrer dans les traitements du chapitre suivant comme donnée.

CHARITRE I

Contexte physique et biotique
de la région d'étude

1. Considérations générales sur les Aurès et la zone d'étude

A l'est de l'Algérie du nord se situent les Aurès. Une région du pays qui se caractérise à la fois par son histoire riche qui remonte si loin dans le temps, sa population traditionnelle ainsi que son relief principalement montagneux, qui se dresse entre les hauts plateaux et le désert.

Du fait des caractéristiques du patrimoine naturel et culturel, les Aurès ont fait aussi bien le sujet de plusieurs documents anciens tel que ; Blayac (1899), Busson (1900), Delartigue (1904), Mitard (1941), B et Ballais (1989), Leveau *et al.* (1990), que l'objet de nombreuses études scientifiques de toutes disciplines.

Sur le plan administratif, la région des Aurès désigne généralement le territoire compris dans le quadrilatère ; Batna, Biskra, Khanga-Sidi-Nadji et Khenchela, sur une longueur de 100 kilomètres environ de côté. Elle s'étend ainsi sur quarante-sept (47) communes partagées entre trois (03) wilayas ; celle de Batna avec vingt — six (26) Communes, celle de Khenchela avec quatorze (14) Communes et enfin celle de Biskra avec sept (7) Communes (figure 1).

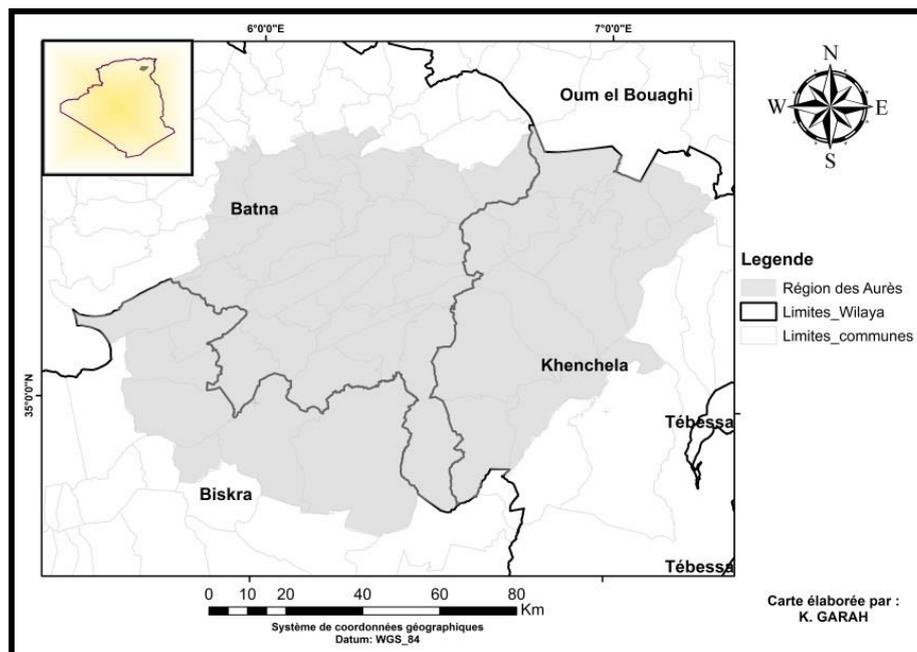


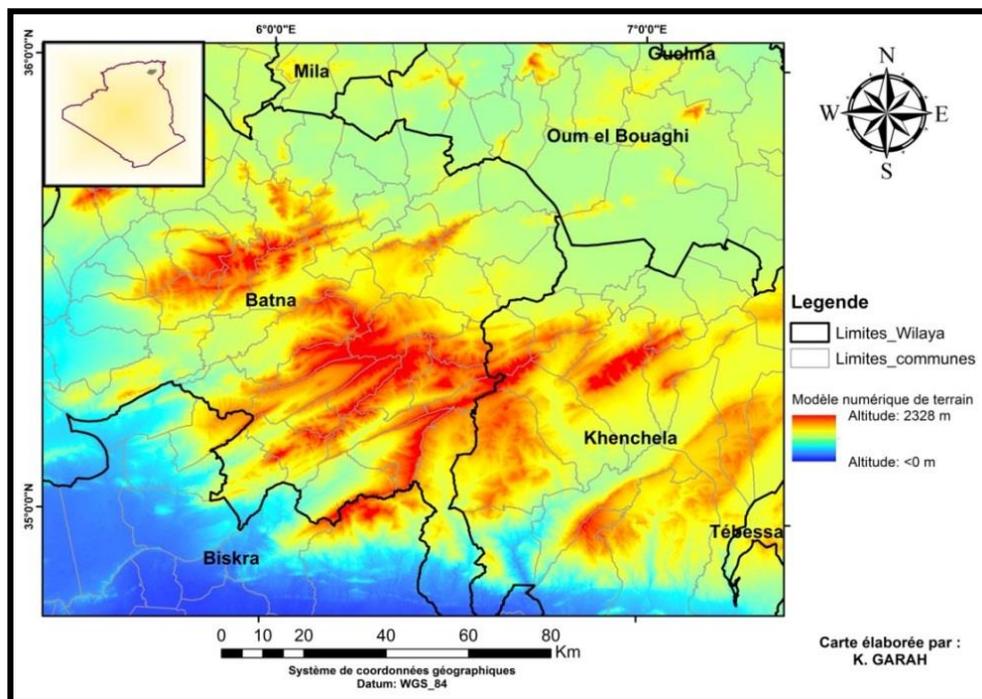
Figure 1. Carte de situation administrative de la région des Aurès.

Le massif des Aurès proprement dit a été décrit par Abdessemed (1981) comme un ensemble montagneux, constitué par une série de plis parallèles, orientés sud-ouest/nord-est qui s'étendent sur une soixantaine de kilomètres. Il se place géographiquement vers 35 ° de latitude nord et 6 à 7 ° de longitude est. En juxtaposition du Sahara, il est le plus méridional de ceux de l'Algérie septentrionale. Son point culminant atteint 2328 mètres à Chélia et se

CHAPITRE I : Contexte physique et biotique de la région d'étude

nomme « Ras Keltoum », représentant ainsi le plus haut sommet de l'Algérie du nord (figure 2). Ses limites naturelles sont marquées ; à l'ouest par l'oued El-Kantara (le pont) et la voie romaine de Lambiridis (El Biar) à Ad Miscinam (Biskra) qui la sépare des monts du Zab ; au sud par la steppe du Chott Melghir et la route de Biskra à Nègrine par Zéribet El Oued ; à l'est par l'Oued El Arab qui la sépare du Djebel Cherchar (mont des cascades) ou Cherchar (mont des cailloux) et qui est suivi par l'ancienne voie romaine de Badès (Ad Badias) à Khenchela (Mascula) ; au nord par la steppe de la Sebkhia Djendli et de la Garaa El Tarf que suit en longeant parfois les premières pentes du massif Aurasien la route carrossable de Batna à Khenchela (Delartigue, 1904).

Le grand trait marquant la région des Aurès est l'existence d'un couvert forestier fort original. Par ailleurs, elle recèle les peuplements de pin d'Alep les plus importants et les plus beaux du pays. Ces derniers se rencontrent essentiellement sur les versants sud dans le massif des Beni Imloul qui couvre près de 75 000 ha (ONTF, 1977) avec des potentialités de croissance très importante. Le pin d'Alep présente aussi une importance particulière dans le massif de Ouled Yagoub qui prolonge le massif des Beni Imloul dans sa partie nord-est. Il compte 45 000 ha environ (BNEDER, 2010) (figure 3).



2. Localisation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée au niveau de l'Aurès oriental partie intégrante de l'Atlas Saharien qui se situe au nord-est de l'Algérie.

La zone d'étude est composée essentiellement par deux massifs contigus. Le massif des Beni Imloul et celui de Ouled Yagoub.

Géographiquement, le massif des Beni Imloul se situe entre les parallèles 35°11' et 35°28' nord ainsi que les méridiens 6°45' et 7°8' Est. Tandis que le massif de Ouled Yagoub est limité par les coordonnées géographiques 6°9' et 6°54' de longitude est, ainsi que 35°17' et 35°54' de latitude nord (figure 3).

Les forêts étudiées se rattachent administrativement à la conservation des forêts de Khenchela, et à la conservation des forêts de Batna qui gère une partie de la forêt de Beni Imloul.

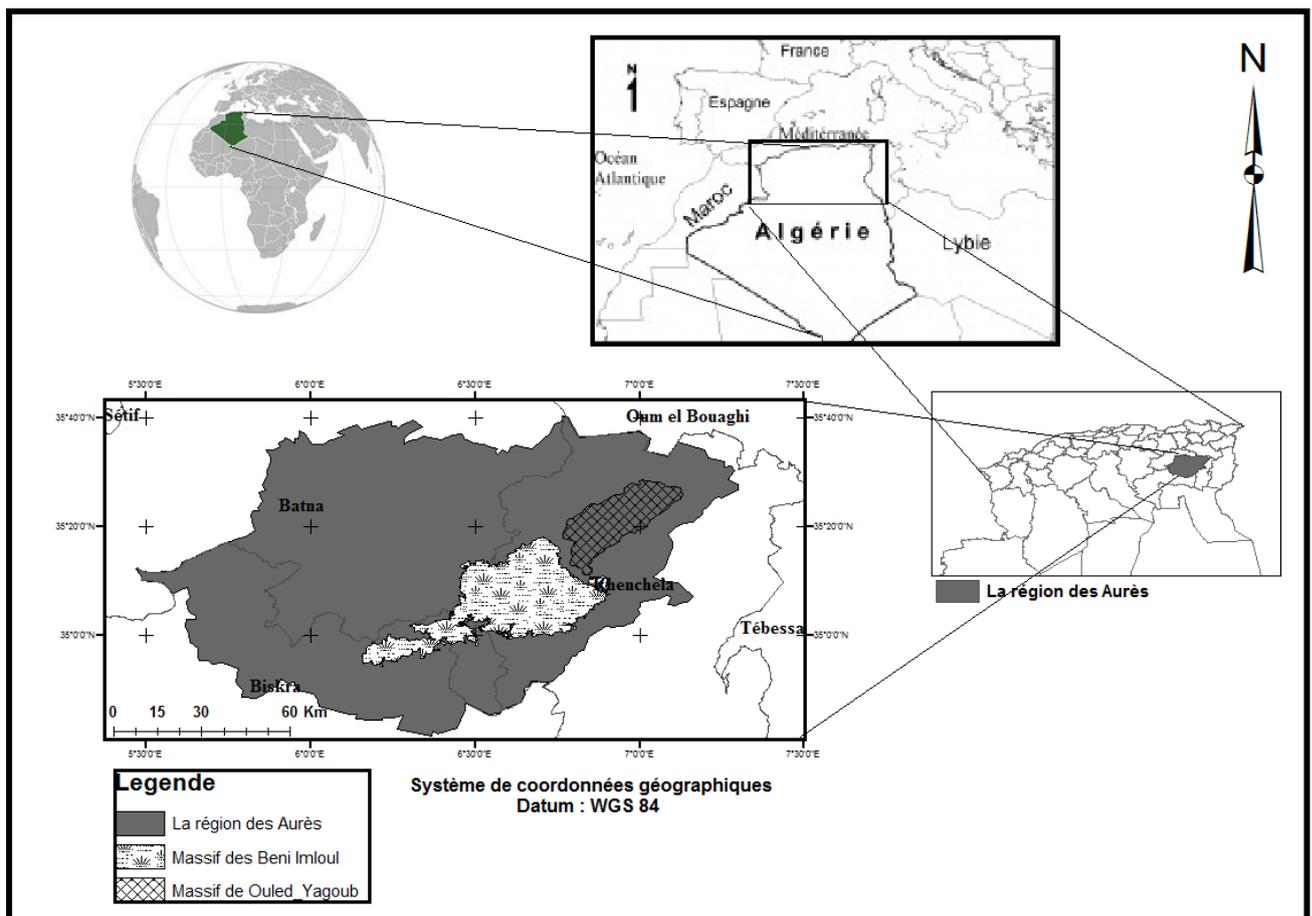


Figure 3. Carte de situation de la région des Aurès et des massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul.

3. Aperçu général sur la végétation de la zone d'étude

Compte tenu des originalités présentées dans les plus grands boisements de cèdre, la pinède la plus importante du pays ; celle des Beni Imloul, les seuls peuplements de thurifère (*Juniperus thurifera*), un peuplement endémique de chêne zeen à petites feuilles (*Quercus canariensis*), les plus grandes formations de frêne épineux (*Fraxinus xanthoxyloides*), ainsi qu'un certain nombre d'espèces rares, Abdessemed (1981) a considéré le massif des Aurès, comme l'un des principaux massifs forestiers de l'Atlas Saharien.

Cette richesse floristique exceptionnelle avec un taux d'endémisme important revêt une grande valeur patrimoniale et un grand intérêt économique, écologique et paysager.

La forêt des Beni Imloul renferme la réserve forestière de pin d'Alep (*Pinus halepensis*) la plus importante du pays, et se présente généralement sous forme de futaie, à sous-bois plus ou moins développé.

Quant à la forêt de Ouled Yagoub, la végétation qui s'y trouve étant beaucoup plus hétérogène, et plus diversifiée qu'à celle des Beni Imloul. Les espèces prédominantes sont principalement le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) sur les versants nord et en hautes altitudes, occupant ainsi les zones les plus humides du massif, ainsi que le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) sur les versants sud et en moyennes altitudes.

Selon Bentouati (2006), dans les stations fraîches, sur le flanc des oueds, se rencontrent également quelques pieds d'If (*Taxus baccata*) en mélange avec l'érable de Montpellier (*Acer monspessulanum*) et le sorbier (*Sorbus aria*).

La strate arborescente est dominée essentiellement par des formations à chêne vert (*Quercus ilex*), à frêne dimorphe (*Fraxinus dimorpha*), et à genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*) au-dessus d'un sous-bois d'Alfa (*Stipa tenacissima*), de Diss (*Ampelodesma mauritanica*), de fillaire (*Phyllaria angustifolia*), de romarin (*Rosmarinus officinalis*) et de globulaire (*Globularia alypum*).

En lisière, une strate arbustive s'individualise en un véritable manteau bien représenté par des espèces xérophiles et calcicoles.

Les différentes espèces végétales sont représentées dans des proportions relativement différentes et variables en fonction de l'altitude, de l'exposition et de la nature du sol. La végétation de la zone d'étude est fortement liée à la géomorphologie.

4. Cadre géomorphologique

La configuration spatiale de la zone d'étude présente une apparence géomorphologique très marquée, faisant apparaître un ensemble montagneux plus ou moins individualisé avec des limites naturelles très distinctives.

Les deux massifs forestiers étudiés se caractérisent par des altitudes assez élevées, l'altitude maximale est de 1749 m à Beni Imloul alors qu'elle culmine jusqu'à 2160 m à Ouled Yagoub (figure 2).

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géomorphologiques établies sur la base du modèle numérique de terrain de la zone d'étude.

Tableau 1. Profil topographique de la zone d'étude

Classes des pentes (%)	Superficie (%)		Classes d'altitudes (m)	Superficie (%)		Exposition	Superficie (%)	
	Ouled Yagoub	Beni Imloul		Ouled Yagoub	Beni Imloul		Ouled Yagoub	Beni Imloul
Horizontal	0,05	0,07	< 700	0,00	2,13	Zone plate	0,01	0,01
Subhorizontal	0,77	0,90	700-900	0,00	8,17	Nord	15,09	9,48
Très faible	6,38	6,79	900-1100	11,44	22,90	Nord-Est	7,05	10,11
Faible	18,44	21,67	1100-1300	36,42	34,31	Est	9,75	14,38
Modérée	16,68	22,97	1300-1500	27,73	25,91	Sud-Est	16,48	16,05
Forte	33,43	36,17	1500-1700	12,58	6,54	Sud	14,46	18,28
Très forte	15,65	8,71	1700-1900	8,71	0,04	Sud-Ouest	8,38	13,01
Extrême	7,48	2,51	1900-2100	3,05	0,00	Ouest	11,15	10,67
Abrupte	1,10	0,21	>2100	0,07	0,00	Nord-Ouest	17,63	7,99
Très abrupte	0,02	0,01	TOTAL	100	100	TOTAL	100	100
TOTAL	100	100						

En termes de superficie, la tranche altitudinale la plus représentative est de 1100 à 1700 m à Ouled Yagoub, et de 900 à 1500 m à Beni Imloul, occupant respectivement 76,73 % et plus de 83 % de la superficie totale (figure 4, tableau 1).

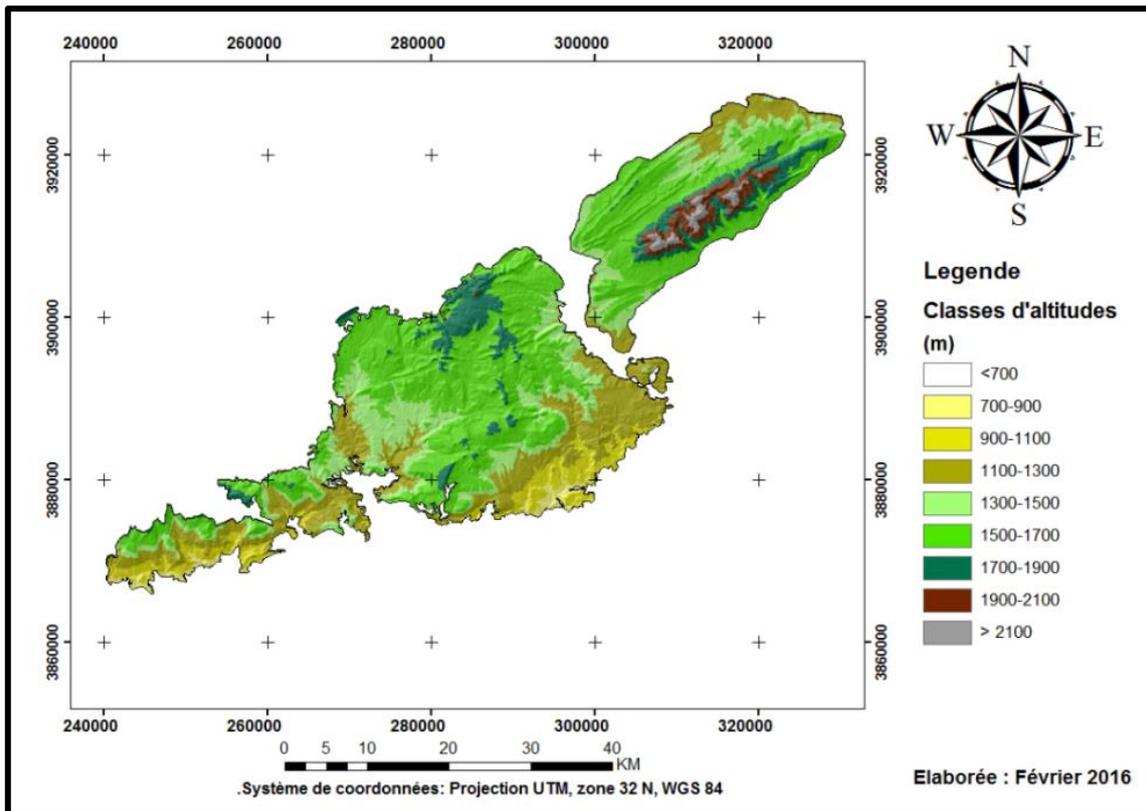


Figure 4. Carte des altitudes des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.

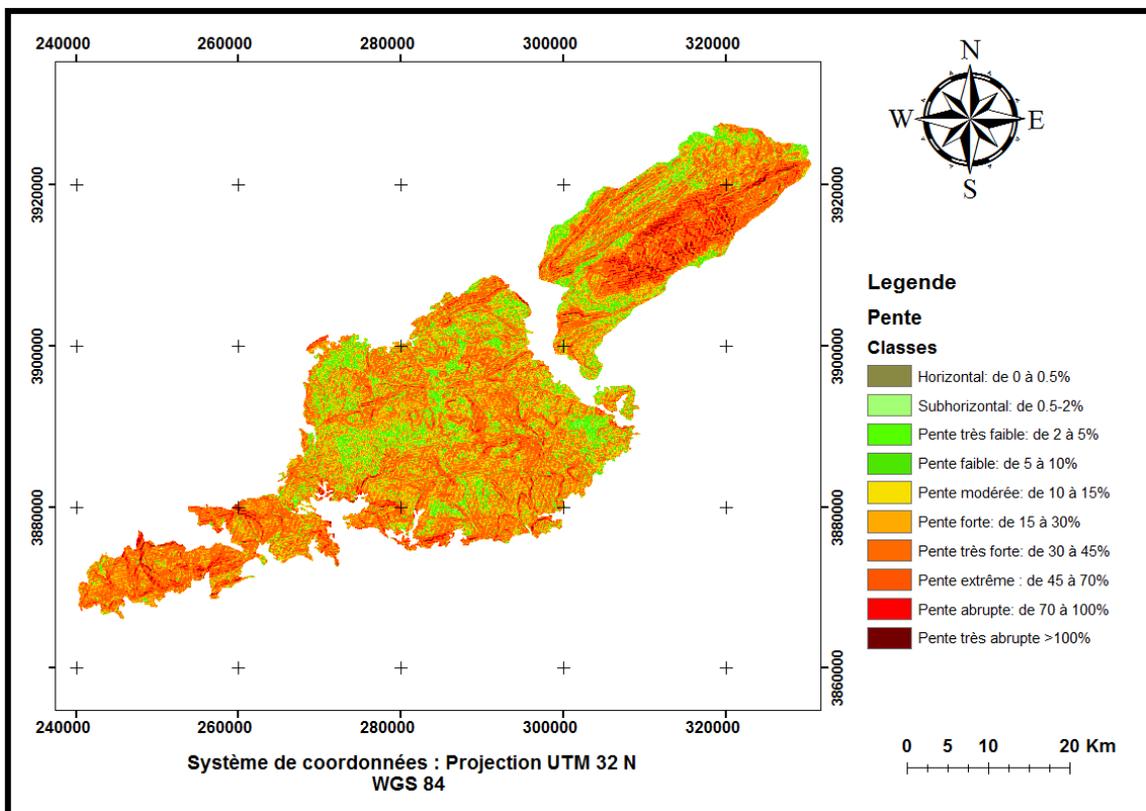


Figure 5. Carte des pentes des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.

Du fait des dénivelés importants et de fortes pentes caractérisant la zone d'étude, le relief étant accidenté et très contrasté, ce qui explique ainsi la configuration et la nature orographique du terrain. En effet, plus de 30 % des terrains constituant les deux massifs étudiés s'installent sur de fortes pentes, comprises entre 15 et 30 %.

Des pentes assez fortes dépassant 30 % s'observent aussi bien à Ouled Yagoub qu'à Beni Imloul, et occupent plus de 25 % de la superficie totale du massif (figure 5, Tableau 1).

Du point de vue exposition des versants, et suite à sa configuration spatiale, la zone d'étude se distingue par des orientations très diversifiées, engendrant ainsi des oppositions microclimatiques assez marquées, par le fait que le facteur exposition constitue un élément déterminant de la répartition des précipitations et des variations des températures, et qui agissent sur la répartition de la végétation par conséquent.

L'observation de la figure 6 et la lecture du tableau 1 montre qu'à Ouled Yagoub, les versants à exposition sud, sud-est et sud-ouest, comme les versants à exposition nord, nord-est et nord-ouest, occupent équitablement environ 39 % de la surface du massif.

Alors que, le massif des Beni Imloul est prédominé par des versants à exposition sud, sud-est et sud-ouest qui occupent presque la moitié de la zone qui se caractérise par un climat rude, marqué par des températures élevées en été et rigoureuses en hiver.

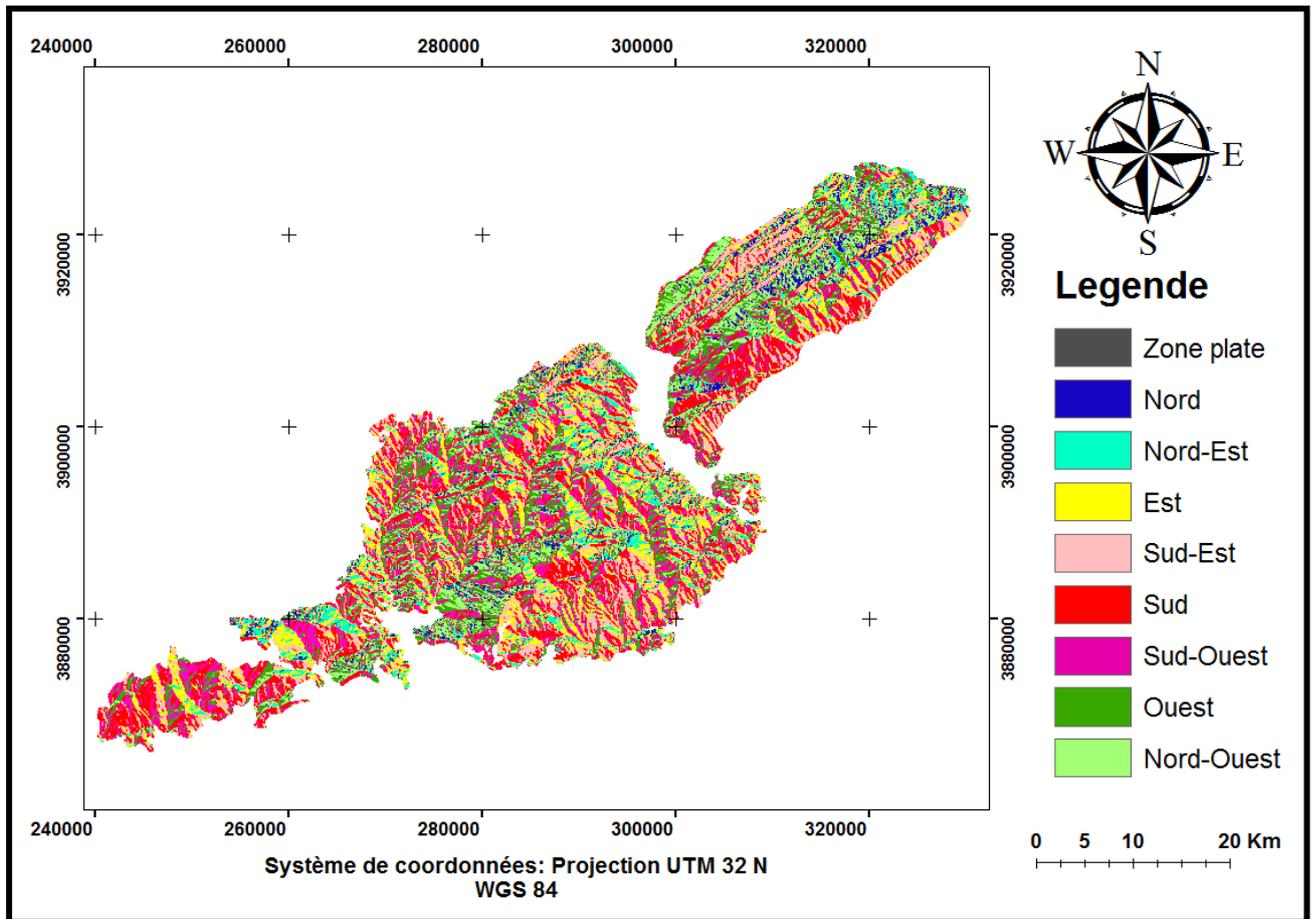


Figure 6. Carte des expositions des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.

5. Cadre géologique et pédologique

En ce qui concerne la géologie de la zone d'étude, l'étude de Laffite (1939) reste un document de base relatif à la géologie de l'Aurès, à partir duquel il s'avère que l'époque du crétacé inférieur est la plus caractéristique dans la zone. En se référant à l'extrait de l'esquisse géologique de l'Aurès, visible à la figure 7, la zone d'étude se caractérise par plusieurs formations géologiques.

Le massif de Ouled Yagoub est prédominé par les formations suivantes :

- L'Aptien, qui s'observe en hautes et moyennes altitudes, avec présence de calcaire et dolomie et prédominance de grès et de marnes rouges et verts.
- L'Albien, qui s'observe en basse altitude sous forme d'une bande plus ou moins régulière autour de la zone couverte par l'Aptien, avec présence des marnes et des calcaires et prédominance de grès et des marnes rouges et verts.
- Le cénomanien qui entoure l'Albien du côté nord, nord-ouest, à sud-ouest, et se prolonge jusqu'à partie nord-est du massif de Beni Imloul. Il est caractérisé par la

CHAPITRE I : Contexte physique et biotique de la région d'étude

présence des calcaires associés aux marnes et marno-calcaires et prédomine les dolomies.

- Coniacien et Santonien avec présence des marnes et calcaire.

On note également la présence du Méocène avec calcaires à lithothamnie associés aux marnes, aux calcaires, grés, molasse et sable, ainsi qu'aux alternances de sables, marins, grés et marnes rouges. Et l'existence du Quaternaire en ilots du côté sud et sud-est, avec cône de déjections torrentiels associé aux alluvions anciennes et récentes.

Le massif des Beni Imloul est caractérisé par la présence quasi totale du Turonien avec calcaires et marnes et prédominance des calcaires à rudistes.

Il est encore à signaler la présence d'autres formations perceptibles à la figure 7.

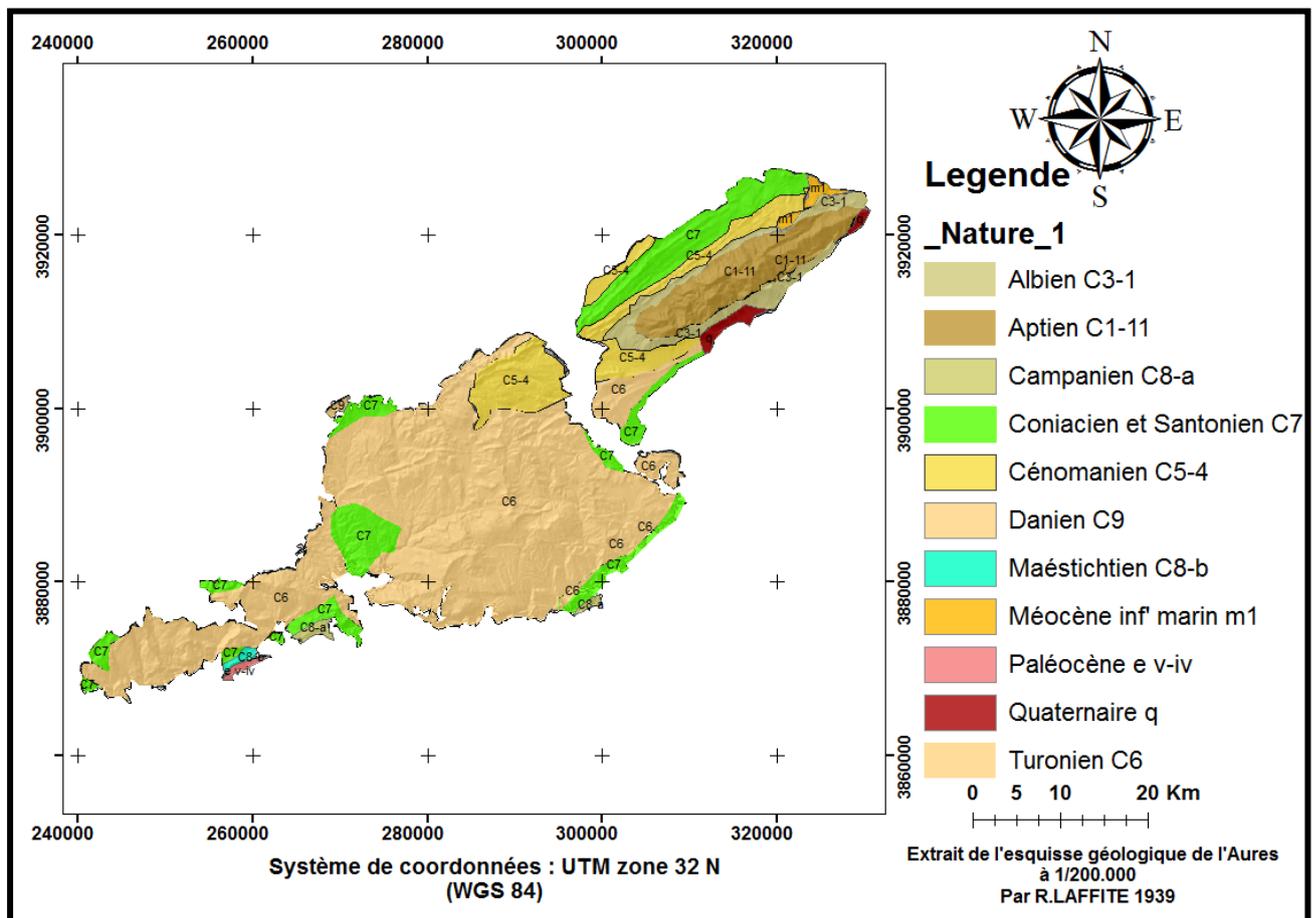
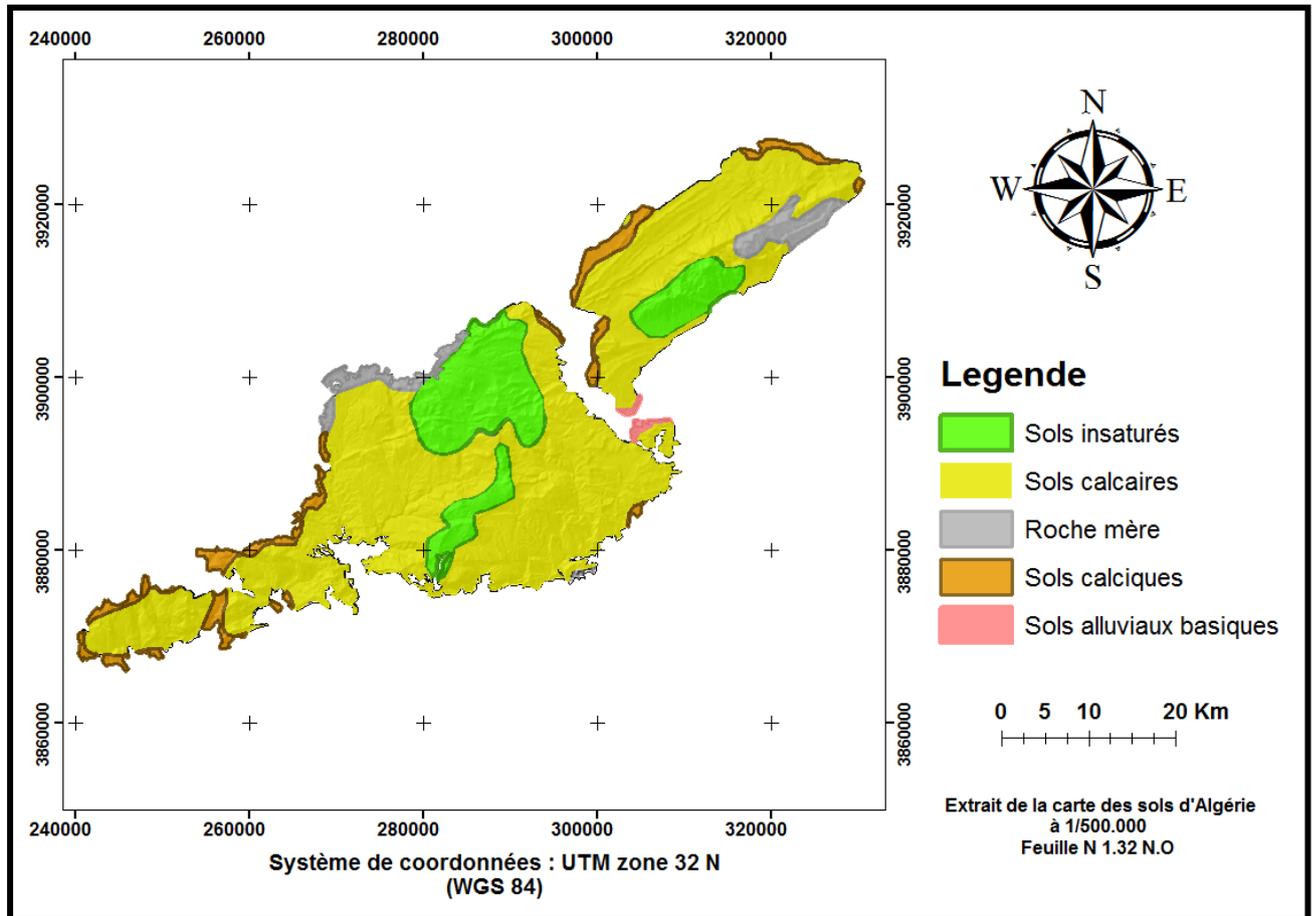


Figure 7. Carte des formations géologiques des massifs de Ouled Yagoub et de Beni Imloul.

Les études portant sur les types de sols des Aurès sont très peu. Par conséquent, les sols de cette région restent dans leur ensemble, insuffisamment connus.

L'examen de la figure 6 montre que les ensembles montagneux étudiés se développent essentiellement sur des substrats calcaires, ce qui a été déjà confirmé par les résultats des analyses du sol menées par Abdessemed (1981) dans la cédraie des Aurès.



6. Cadre hydrographique

Les ressources hydrographiques qui caractérisent la région des Aurès font partie du bassin des Chotts sahariens Melrir et el Rarsa. Ses cours d'eau sont presque secs durant la plus grande partie de l'année, mais la saison des pluies ils roulent des eaux torrentielles dont les effets de déblaiement sont considérables (Blayac, 1899).

Le réseau hydrographique de la région des Aurès (figure 9) a été décrit par Delartigue (1904), et Abdessemed (1981) comme endoréique ou aréique pour l'ensemble du massif. Parmi les oueds, les uns sont sahariens, les autres, en général plus courts, se perdent dans les dépressions des hautes plaines.

CHAPITRE I : Contexte physique et biotique de la région d'étude

Quant au versant saharien, quatre (04) vallées creusent le massif de l'Aurès. Il s'agit de l'*oued El-Kantara* et son affluent principal *oued Abdi*, l'*oued El Abiod* ainsi que l'*oued El Arab*. Ces derniers oueds traversent le massif du nord-est vers le sud-ouest et constituent des compartimentages dans la structure géographique.

Les cours d'eau appartenant au versant de la plaine des Sbakhs se versent dans la Sebkhia Djendeli et la Gueraa El Tarf. Ces derniers lacs salés sont les seules qui reçoivent les rivières venant de l'Aurès. Les principaux oueds alimentant ces milieux sont, selon Abdessemed (1981) ; *oued Chemora* et *oued Boulefreis*.

Les débits des oueds aurasiens comme pour la plupart des oueds nord-africains sont très variables : très élevés pendant la saison humide, et très faibles pendant la saison estivale (Abdessemed, 1981).

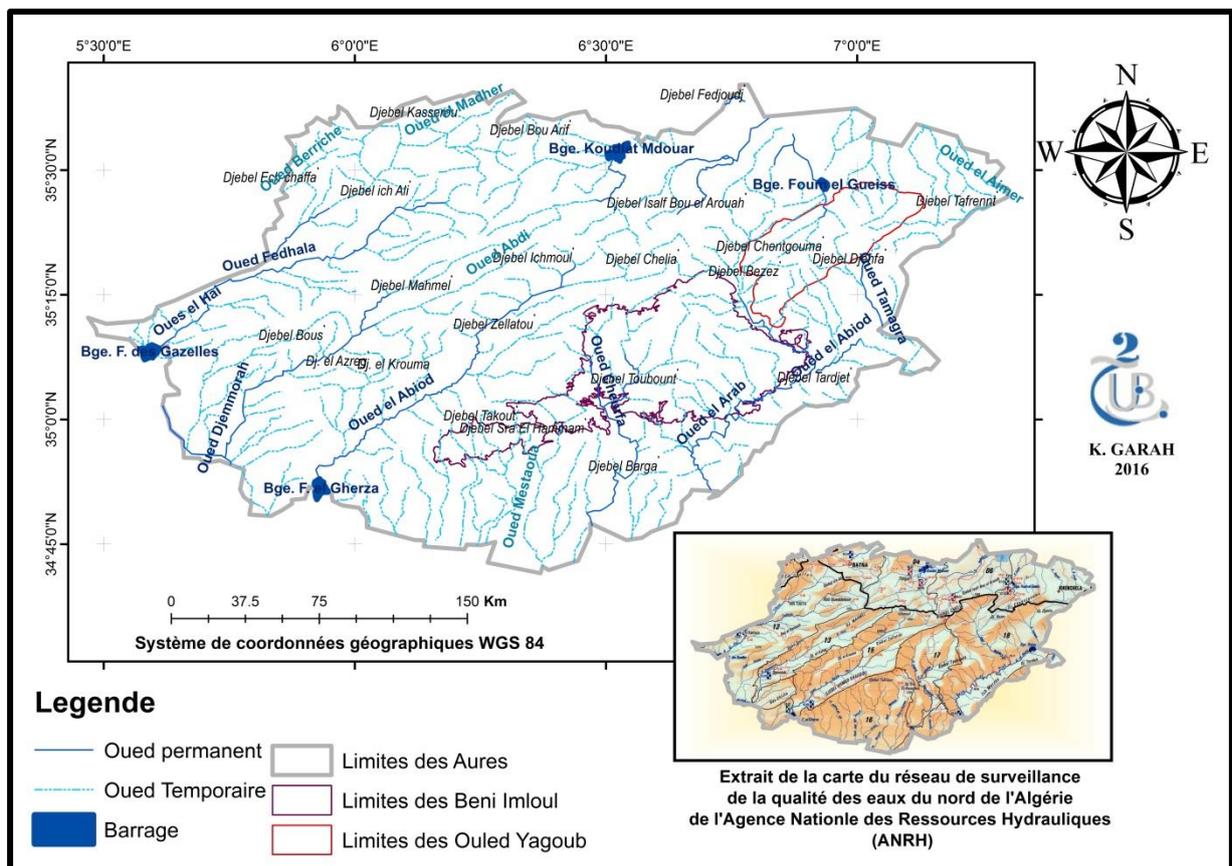


Figure 9. Carte de réseau hydrographique de la région des Aurès.

CHARITRE II

Caractérisation climatique de
la région des Aurès

Introduction

Le climat représente le facteur déterminant fondamental de la distribution des organismes, dont l'influence s'exerce et peut être perçue à toutes les échelles d'observation de la biosphère. A ce titre, la composante climatique peut être utilisée comme référence, selon ses divers niveaux de perception (échelle spatiale), pour la hiérarchisation des écosystèmes (Lacoste et Salanon, 1999).

En Algérie, comme pour la plupart des pays méditerranéens, le climat tire son originalité du relief très contrasté qui impose une variabilité climatique très perceptible allant du nord vers le sud.

Dans les Aurès ou l'Aurès, les contraintes de paramètres climatiques sont liées principalement à la disponibilité de l'eau pour les plantes et ses conséquences sur les écosystèmes forestiers.

Bien que, toute description climatique ne repose qu'en partie sur la température et les précipitations, et doit inclure tous les facteurs météorologiques tels que l'humidité relative de l'air, le vent, l'ensoleillement, pour n'en citer que quelques-uns. Ni s'en tenir à un calcul de moyennes de ces paramètres climatiques qui ne remplacent certainement les informations qu'apportent les valeurs extrêmes, les écarts et les distributions. Mais, malheureusement rares sont les stations qui entreprennent régulièrement des mesures de tous éléments du climat dans la région d'étude, un bon nombre d'entre elles ne mesurent que des précipitations, et quelquefois des températures.

Ainsi, devant de telle contrainte, on se trouve dans l'obligation de s'appuyer sur des paramètres climatiques pluviométriques et thermiques, dans l'analyse statistique et cartographique du climat des Aurès.

Matériel et méthodes

Vue l'étendue de surface de notre région d'étude si importante que nous utilisons des variables climatiques recueillies auprès de plusieurs stations météorologiques réparties çà et là en différentes altitudes qu'aux versants, essentiellement dans la partie orientale des Aurès où se concentre notre travail de terrain.

Les caractéristiques administratives et géographiques des stations de références sont inscrites dans le tableau 2. La répartition spatiale des stations de référence est illustrée par la figure 10.

Tableau 2. Description géographique et administrative des stations météorologiques prises pour l'étude.

Nom de Station	Code ANRH	Coordonnées Lambert		Altitude (m)	Versant	Nombre d'années d'observation
		X (Km)	Y (Km)			
Foum Elgueiss	07 07 20	884,5	250,15	945	Nord	14
Ain mimoun	07 07 04	886,35	243,6	1180	Nord	41
Tizi Ala	07 07 03	887,2	241,4	1345	Nord	25
Chelia	07 06 06	858,85	237,1	1260	Nord	45
Yabous	07 06 04	858,45	239,65	1200	Nord	45
El-Hamma	06 18 13	870,35	220,5	1050	Nord	18
Kheirane	06 18 05	870,55	197,1	560	Sud	44
Bouhammama	06 18 03	867	228,5	1140	Sud	43
T'kout	06 15 05	829,15	210,5	998	Sud	42
Medina	06 15 03	849,7	230,5	1570	Sud	46
Menaa	06 13 04	801,25	213,25	983	Sud	43
Batna	06 04 68	/	/	1052	/	44

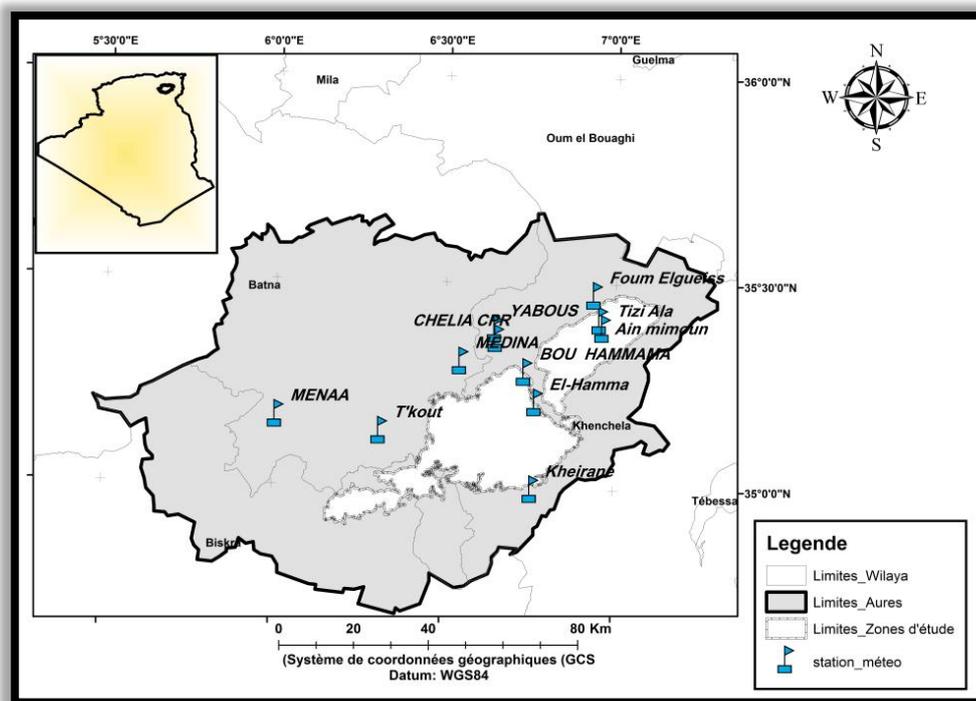


Figure 10. Carte de distribution spatiale des stations météorologiques de référence.

Il est cependant à signaler que ce réseau d'observation météorologique est peu représentatif, du fait des stations souvent mal situées (et/ou) fournissant peu de paramètres météorologiques (généralement que des précipitations) (et/ou) enregistrés sur de courtes durées (et/ou) présentées en séries discontinues, en raison de lacunes.

Pour pallier à ce problème, et pour un diagnostic climatique complet et moderne, nous avons considéré par ailleurs des données climatiques spatialisées des systèmes d'information géographique, qui permettront d'analyser la variabilité spatiale des climats et des bioclimats de la région d'étude. Les données précitées concernent des bases de données bioclimatiques mondiales qui sont libres de droits et gratuitement téléchargeables à partir des sites web : <http://www.worldclim.org/> et <https://www.york.ac.uk/>.

La base de données *worldclim* (Hijmans *et al.*, 2005) dans ses deux versions (l'ancienne version 1,4 et la nouvelle ; version 2) est un ensemble de couches de climat global avec une bonne résolution spatiale (30'' soit 1 km² environ) destinées essentiellement à la cartographie et à la modélisation spatiale. En plus des données climatiques mensuelles interpolées relatives à la moyenne et aux moyennes des minimums et des maximums de la température ainsi que des précipitations, la base de données comporte également 19 variables bioclimatiques dérivées.

Ces données correspondent aux valeurs moyennes pour la période 1960-2000.

La base de données *africlim* (Platts *et al.*, 2015) englobe des projections de haute résolution de l'ensemble de climats de l'Afrique. Elle comprend des grilles mensuelles de températures et de précipitations ainsi que des variables synthétiques bioclimatiques dérivées, en format GeoTTIFS.

Afin de définir les particularités climatiques de notre région d'étude, nous avons fait appel à deux paramètres météorologiques, que sont les précipitations et les températures, qui sont considérées comme étant les principaux paramètres permettant de caractériser les climats. A partir de ceux-ci, nous avons calculé plusieurs paramètres bioclimatiques.

Quant à la station de Batna, des données climatiques de longues séries sont également exploitées dans cette étude, étant donné qu'elles sont mises à disposition gratuitement sur l'explorateur climatique KNMI, à partir du site web : <https://climexp.knmi.nl>

Résultats et discussion

1. Les précipitations

1.1. Données classiques

Les séries pluviométriques qui ont servi à notre étude se rapportent à 12 stations (tableau 3). A l'exception des stations de Foum Elgueiss de El-Hamma et de Tizi Ala, chaque station dispose d'une série d'observations supérieure à 40 ans. Les séries relatives aux 3 stations suscitées et qui font l'exception sont respectivement 14, 25 et 18 ans.

Les quantités pluviométriques que reçoivent les stations de références montrent que la région d'étude est sujette à une forte variabilité tant spatiale que temporelle.

Les différentes stations météorologiques ont enregistré des tranches pluviométriques oscillant entre un minimum de 214,8 mm pour Kheirane et un maximum de 522,6 mm pour Chelia, reflétant ainsi la prédominance de l'influence de l'altitude et de l'exposition.

Nous remarquons que toutes les stations localisées au nord reçoivent des hauteurs pluviométriques les plus élevées, dépassant entièrement les 400 mm par an.

Les stations de Bouhmama et de Medina comptent parmi celles les plus arrosées, alors qu'elles sont localisées sur versant sud. C'est l'influence de l'altitude qui prédomine dans ce cas ; Bouhmama se situe à 1140 m, et Medina à 1570 m présentant ainsi la station la plus élevée des 12 stations de référence.

Les stations localisées au sud et à basses altitudes reçoivent des tranches pluviométriques les plus faibles, ne dépassent que rarement 300 mm par an.

CHAPITRE II : Caractérisation climatique de la région des Aurès

En moyenne, la partie orientale des Aurès reçoit une faible tranche pluviométrique de l'ordre de 392 mm par an.

Les totaux pluviométriques annuels sont caractérisés par des fluctuations intra-annuelles. Les précipitations les plus abondantes sont enregistrées au cours de 9 mois allant de septembre jusqu'au mois de mai. La période estivale étant la période la moins arrosée et les 3 mois (juin, juillet, août) reçoivent les quantités pluviométriques les plus faibles (figure 11).

Tableau 3. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la région des Aurès.

Station	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jll	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Totaux
Medina	37,8	32,5	45,2	42,7	44,7	27,6	13,6	29,4	51,4	39,7	40,0	41,3	445,9
Tizi Ala	49,2	45,5	62,2	52,0	47,1	20,1	16,5	15,7	41,0	34,4	46,0	51,2	481,4
Chelia	54,7	38,3	62,7	47,8	57,1	31,6	14,2	34,5	46,7	42,6	51,3	41,1	522,6
Yabous	37,9	31,2	51,3	40,0	46,1	20,8	13,1	22,7	40,8	29,2	35,8	32,6	401,3
Ain mimoun	40,1	39,8	58,2	42,8	46,6	23,4	11,4	27,0	37,5	38,1	36,3	36,6	437,8
Bouhamama	38,4	33,0	41,3	37,2	42,9	25,3	18,2	27,2	45,7	36,2	36,5	30,8	412,7
Batna	37,9	19,0	8,0	17,7	37,8	27,4	29,8	30,6	31,7	31,3	36,5	36,6	344,4
El-Hamma	43,8	30,9	40,4	50,6	63,9	26,5	16,2	37,8	65,9	37,8	38,2	39,5	482,5
T'kout	21,9	16,7	24,8	25,2	29,6	18,2	8,3	17,5	38,3	36,4	24,8	19,1	280,8
Mena	21,1	22,9	31,0	24,7	25,7	10,9	3,9	9,9	34,0	27,2	28,3	31,6	271,3
Foum Elgueiss	40,6	25,6	47,7	30,7	41,7	35,8	11,5	24,1	36,6	29,0	41,3	43,5	408,0
Kheirane	14,3	15,8	23,2	22,6	24,6	12,5	4,5	7,4	30,0	25,6	22,4	12,0	214,8

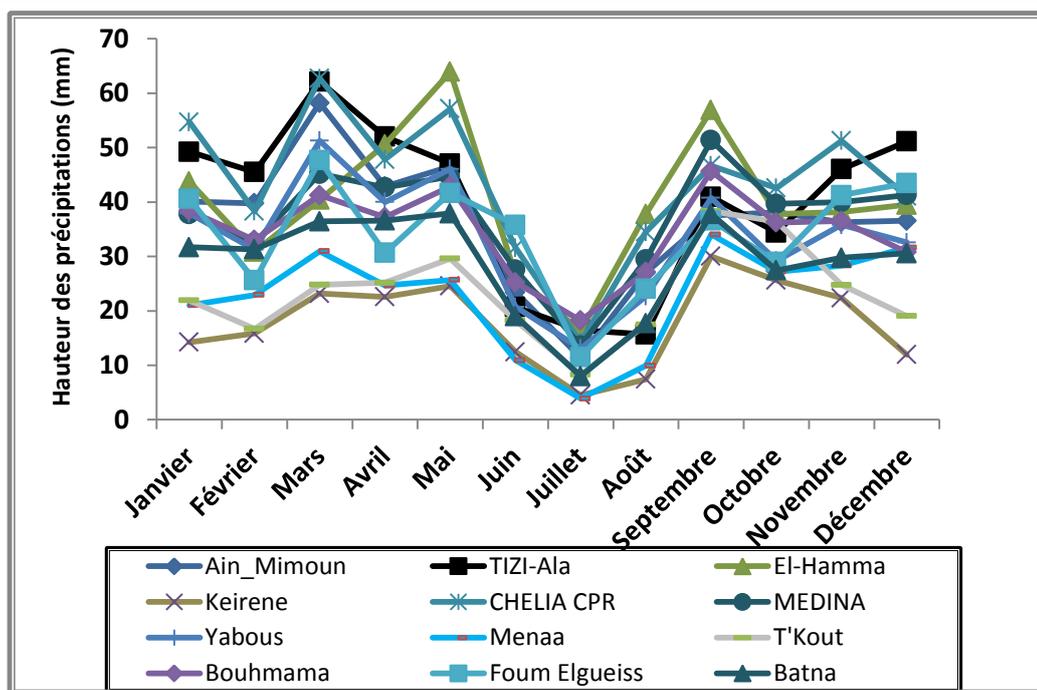


Figure 11. Variations mensuelles des hauteurs des précipitations des stations de référence.

Pour le régime saisonnier, la répartition des pluies dans la partie orientale des Aurès, présente une certaine variabilité intersaisonnière. Pour toutes les stations de référence, le printemps étant la saison la plus arrosée, avec un total moyen de 123,75 mm, ce qui correspond à un taux moyen de 32 %, suivi par l'automne 110,92 mm soit 29 % puis l'hiver 100,39 mm soit 25 %.

Le total moyen minimal est enregistré en été avec 56,88 mm. En moyenne, les pluies estivales ne constituent que 14 % du total reçu par la région des Aurès. Ce pourcentage passe de 9,12 % pour la station de Mena à 17,49 % pour la station de Foum Elgueiss.

Par conséquent, le régime pluviométrique moyen pour la partie orientale des Aurès, est de type **PAHE** (figure 12), dont ; P (printemps), A (automne), H (hiver), E (été). Ce qui correspond aux écosystèmes forestiers méditerranéens.

Ce régime présente sensiblement la même tendance pour toutes les stations de références. Pour les stations de Ain mimoun et Foum Elgueiss qui ont montré un régime saisonnier différent, de type **PHAE**, les quantités pluviométriques reçues au cours de la saison hivernale présentent un léger surplus par rapport à la saison automnale.

Tableau 4. Régime pluviométrique saisonnier et taux des pluies des stations de référence.

Station	Automne		Hiver		Printemps		Eté		Type climatique
	Total (mm)	Taux (%)							
Medina	131,06	29,39	111,62	25,03	132,59	29,73	70,63	15,84	PAHE
Tizi Ala	121,40	25,22	145,89	30,31	161,26	33,50	52,84	10,98	PAHE
Chelia	140,56	26,90	134,05	25,65	167,70	32,09	80,31	15,37	PAHE
Yabous	105,76	26,35	101,72	25,35	137,33	34,22	56,49	14,08	PAHE
Ain mimoun	111,96	25,57	116,41	26,59	147,62	33,72	61,83	14,12	PHAE
Bouhamama	118,43	28,70	102,22	24,77	121,34	29,41	70,66	17,12	PAHE
Batna	95,01	27,59	93,59	27,18	110,98	32,23	44,77	13	PAHE
El-Hamma	132,89	27,55	114,11	23,65	154,92	32,11	80,53	16,69	PAHE
T'kout	99,52	35,43	57,71	20,55	79,58	28,34	44,03	15,68	PAHE
Menea	89,58	33,03	75,61	27,88	81,33	29,98	24,73	9,12	PAHE
Foum Elgueiss	106,88	26,20	109,68	26,89	120,04	29,42	71,36	17,49	PHAE
Kheirane	78,03	36,32	42,05	19,58	70,36	32,75	24,37	11,34	PAHE
Moyenne	110,92	29,02	100,39	25,28	123,75	31,46	56,88	14,24	PAHE

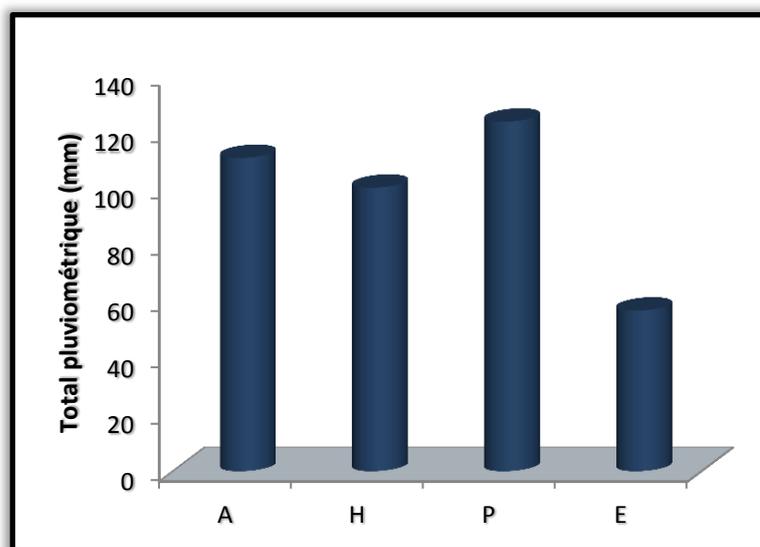


Figure 12. Répartition saisonnière moyenne des précipitations dans les Aurès.

Dans la mesure de disponibilité des données, une étude diachronique a été établie pour certaines stations, plus particulièrement pour la station de Batna, celle de Ain mimoun, de T'kout et de Menaâ. Mis à part la station de Batna, les données des dernières décennies des stations sont mises en comparaison avec les séries pluviométriques de Seltzer (1946) qui couvrent une période de 25 ans allant de 1913 à 1938 ; les conclusions suivantes sont retenues :

- Une diminution du total pluviométrique estimée à 24 % est observée pour la station de Ain mimoun. Alors que pour la station de T'kout, le module pluviométrique passe de 266 mm durant la période ancienne à 281 mm pour la période récente. Cette augmentation est insignifiante contrairement à la tranche pluviométrique totale reçue par la station de Menaâ qui reste relativement stable.

L'étude diachronique de la station de Batna est réalisée par la superposition des données récentes et des données anciennes (figure 13).

Les moyennes des hauteurs des précipitations mensuelles et annuelles utilisées pour la station de Batna sont celles enregistrées au cours de deux périodes distinctes (tableau 5) récoltées à partir du site : <https://climexp.knmi.nl>. La première est pour la période 1855-1887 durant laquelle nous avons enregistré une moyenne de 586,5 mm avec un régime pluviométrique saisonnier de type *PAHE*. La deuxième période allant de 1972 à 2014 est marquée par une moyenne de 344,4 mm et un régime pluviométrique saisonnier de type *PHAE*.

Tableau 5. Précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station de Batna.

Station de Batna	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jll	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Totaux
[1855-1887]	53,8	52,8	67,7	65,9	53,5	35,4	15,8	30,2	40,9	54,8	51,5	64,3	586,5
[1972-2014]	37,9	19,0	8,0	17,7	37,8	27,4	29,8	30,6	31,7	31,3	36,5	36,6	344,4

L'analyse des moyennes interannuelles des précipitations visibles à la (figure 13) montre une diminution accrue de ces valeurs au cours de la période récente. Cette diminution totale est estimée à 41 %. Elle est perceptible pour l'ensemble des mois, mais bien accentuée pour les saisons hivernales et printanières.

Sur le plan intra-annuel, une différence est encore enregistrée pour le régime saisonnier entre les deux périodes mises à comparaison. Le climat passe du type *PHAE* pour l'ancienne période au type *PAHE* pour la période actuelle.

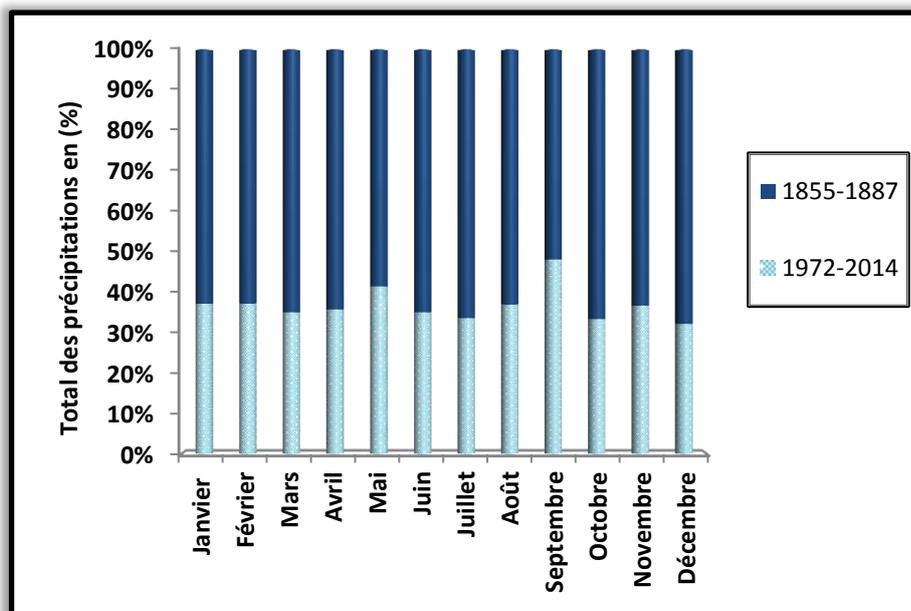


Figure 13. Présentation diachronique des précipitations de la station de Batna.

L'évolution temporelle des précipitations enregistrées par des stations météorologiques des Aurès est illustrée par la figure 14 qui montre que les précipitations présentent une nette tendance à la baisse, avec une succession très irrégulière des années pluvieuses.

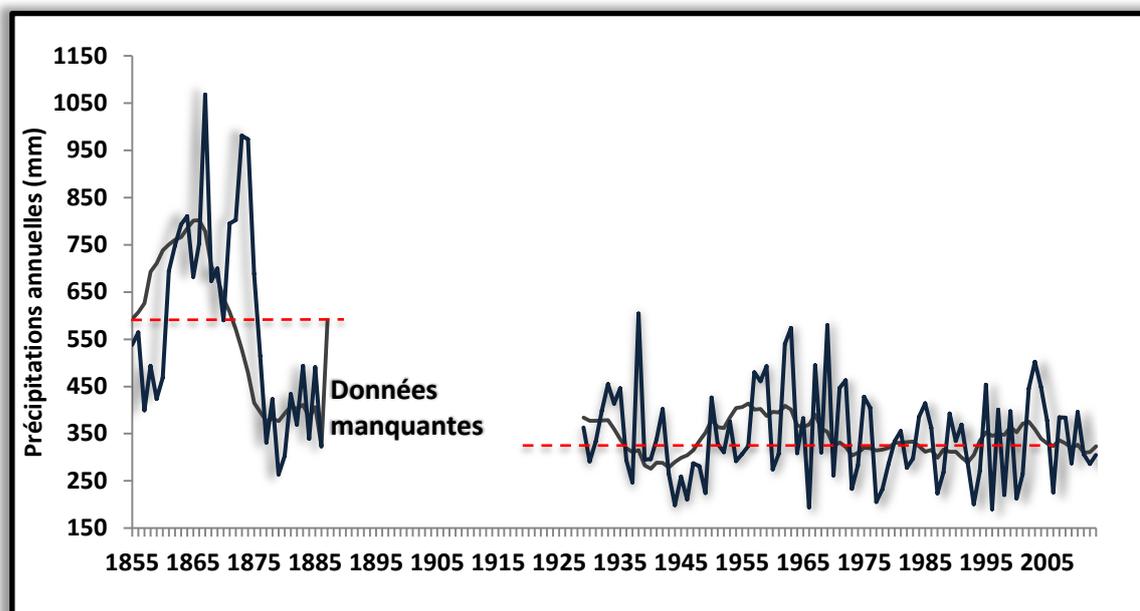


Figure 14. Evolution temporelle des précipitations de la région des Aurès.

La figure 15 montre qu’au cours des 44 dernières années, des pluies excédentaires ont été enregistrées pour 20 ans d’observations. Paradoxalement, 50 % de ces années pluvieuses correspondent exclusivement à la douze dernières années. Cependant, ces précipitations sont souvent torrentielles, atteignant leur maximum pendant la saison printanière et automnale. En moyenne, 2003, 2010, 1995, 2004 et 2008 sont des années pluvieuses les plus exceptionnelles, avec un cumul pluviométrique dépassant 500 mm. Les faibles enregistrements sont observés pour les années 1996 et 2000, avec des pluies les plus déficitaires de l’ordre de moins de 250 mm.

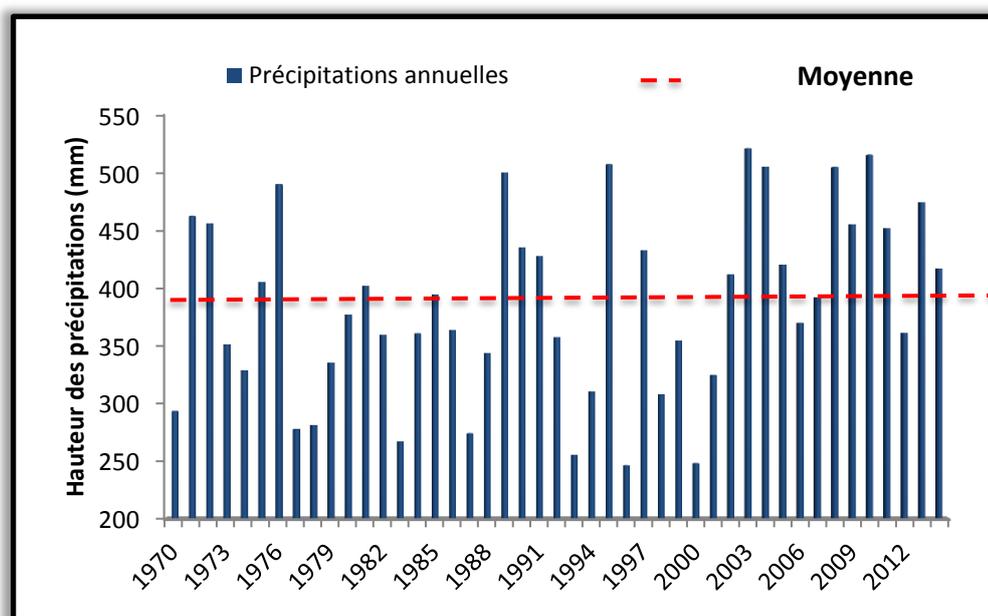


Figure 15. Observations inter annuelles des hauteurs pluviométriques des Aurès.

Nous avons adopté une classification des années pluviométriques en années pluvieuses et années non pluvieuses. La première correspond aux années dont la hauteur pluviométrique annuelle soit supérieure au total moyen, et *vice versa*.

Le tableau 6 nous permet d’appréhender la distribution spatio-temporelle des années pluvieuses et non pluvieuses sur l’ensemble des stations de référence prises en considération et sur toute la période étudiée.

Pour une période d’observations variant entre 41 et 45 ans, nous avons pu distinguer un certain équilibre entre les années pluvieuses et celles non pluvieuses, dans chacune des stations de Medina, Chelia, Yabous, Ain mimoun, Bouhmama et Khierane.

CHAPITRE II : Caractérisation climatique de la région des Aurès

En revanche, les stations de Batna T'kout et Menaâ ont enregistré une inégalité de nombre des années pluviométriques en faveur d'années non pluvieuses. Avec un surplus estimé respectivement à 5, 5, et 9 années non pluvieuses.

Avec une moyenne pluviométrique enregistrée au cours des années pluvieuses, estimée à 608,3 mm, la station de Chelia étant la plus arrosée. Tandis que Kheirane représente la station la moins arrosée, avec une moyenne des années pluvieuses de l'ordre de 275,6 mm.

Quant aux records extrêmes, les valeurs maximales oscillent entre 437,1 mm (Kheirane) et 920,5 mm (Yabous). Alors que les valeurs minimales ne dépassent pas 252,7 mm (Chelia), et les enregistrements les plus faibles correspondent à la station de Khierane et celle de Menaâ qui ne reçoivent que 37 mm et 51,5 mm.

Tableau 6. Variations annuelles des précipitations pour la période (1970-2014).

Station		Medina	Chelia	Yabous	Ain mimoun	Bou-hamama	Batna	T'kout	Menaâ	Kheirane
Année(s) pluvieuse(s)	N ^{bre}	22	22	23	20	22	19	18	16	22
	P _{moy} (mm)	566,4	608,3	500,2	546,2	523,2	485,4	382,4	356,9	275,6
	La plus arrosée	2004/ 2005	1976/ 1977	2013/ 2014	1989/ 1990	1971/ 1972	2003/ 2004	1995/ 1996	1981/ 1982	1990/ 1991
	P _{annuelle} (mm)	896,4	771,2	920,5	704,4	726,6	641,9	552,2	551,7	437,1
Année(s) non pluvieuse(s)	N ^{bre}	23	23	22	21	21	24	23	25	22
	P _{moy} (mm)	325,8	411,4	297,1	343,0	295,3	304,8	199,3	194,2	135,2
	La moins arrosée	1997/ 1998	1977/ 1978	1991/ 1992	1996/ 1997	1983/ 1984	1977/ 1978	1973/ 1974	1990/ 1991	2005/ 2006
	P _{annuelle} (mm)	225,1	252,7	138,8	139,9	209,0	204,7	51,5	128,3	37

1.2. Données spatialisées

Les données climatiques interpolées correspondantes au paramètre précipitations sont des couches de précipitations mensuelles tirées à partir de *Worldclim*.

En totalisant les douze couches des précipitations mensuelles, découpées pour la région des Aurès, nous obtenons une carte de distribution spatiale des hauteurs pluviométriques figure 16, avec une table attributaire contenant les informations relatives aux quantités des précipitations exprimées en mm.

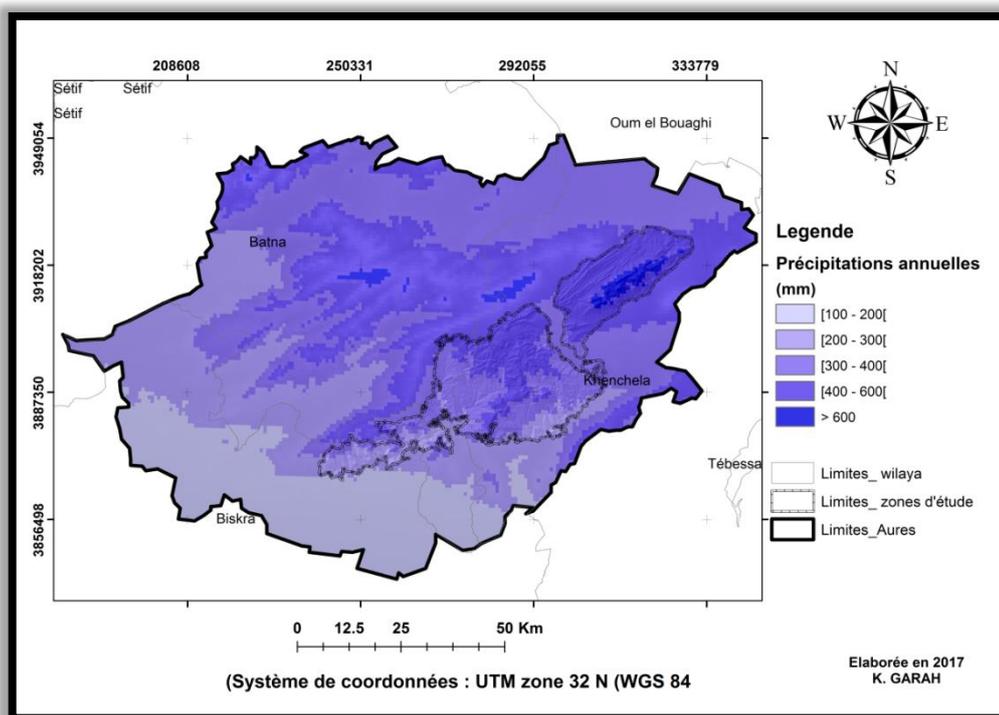


Figure 16. Carte de distribution spatiale des hauteurs des précipitations annuelles de la région des Aurès.

Les résultats montrent que la région d'étude reçoit annuellement une tranche pluviométrique moyenne de 420 mm. Cette quantité oscille entre un minimum de 128 mm et un maximum de 747 mm, et témoigne ainsi la variabilité pluviométrique spatiale que présente la région d'étude, celle-ci est estimée à plus 40 %.

La variabilité spatiale des précipitations de la région d'étude illustrée par la carte visible à la figure 16 étant tridimensionnelle, tant longitudinale que latitudinale et altitudinale. De ce fait, la carte met en exergue l'évolution régressive des cumuls pluviométriques selon un gradient de l'est en ouest, du nord au sud, et de la haute à basse altitude.

Quant à la classification retenue pour les quantités pluviométriques annuelles, c'est celle soutenue par Pouget (1980) pour la définition des étages bioclimatiques. En conséquence, la région des Aurès se caractérise par des étages bioclimatiques allant de l'aride, puis semi-aride, jusqu'au subhumide. L'aride est subdivisé en aride inférieur, aride moyen et aride supérieur.

Tableau 7. Récapitulatif des statistiques de la table attributaire des précipitations annuelles

Statistiques descriptives	min	128 mm
	Max	747 mm
	Moy	420 mm
	CV	40,45 %
Importance des classes des hauteurs pluviométriques	[100_200 [	16 %
	[200_300 [	20 %
	[300_400 [	31 %
	[400_600 [	32 %
	> 600	2 %

Il est à noter que 63 % du territoire aurasien reçoit annuellement entre 300 et 600 mm de pluies, distribuées entre l'étage bioclimatique aride supérieur (31 %) et l'étage semi-aride (32 %).

Alors que les régions de l'étage bioclimatique subhumide où il pleut annuellement plus de 600 mm occupent une superficie très réduite qui ne dépasse pas 2 %. Les 16 % qui restent de la superficie totale sont dominés par un climat aride.

Les précipitations saisonnières spatialisées sont également obtenues par addition des couches des cumuls pluviométriques mensuelles, trimestre par trimestre relatif à chaque saison.

Le résultat exprimé par la figure 17 montre que le printemps étant la saison la plus arrosée, alors que les faibles pluies sont reçues au cours de la saison estivale.

Généralement, le régime pluviométrique de la région des Aurès est de type *PHAE*.

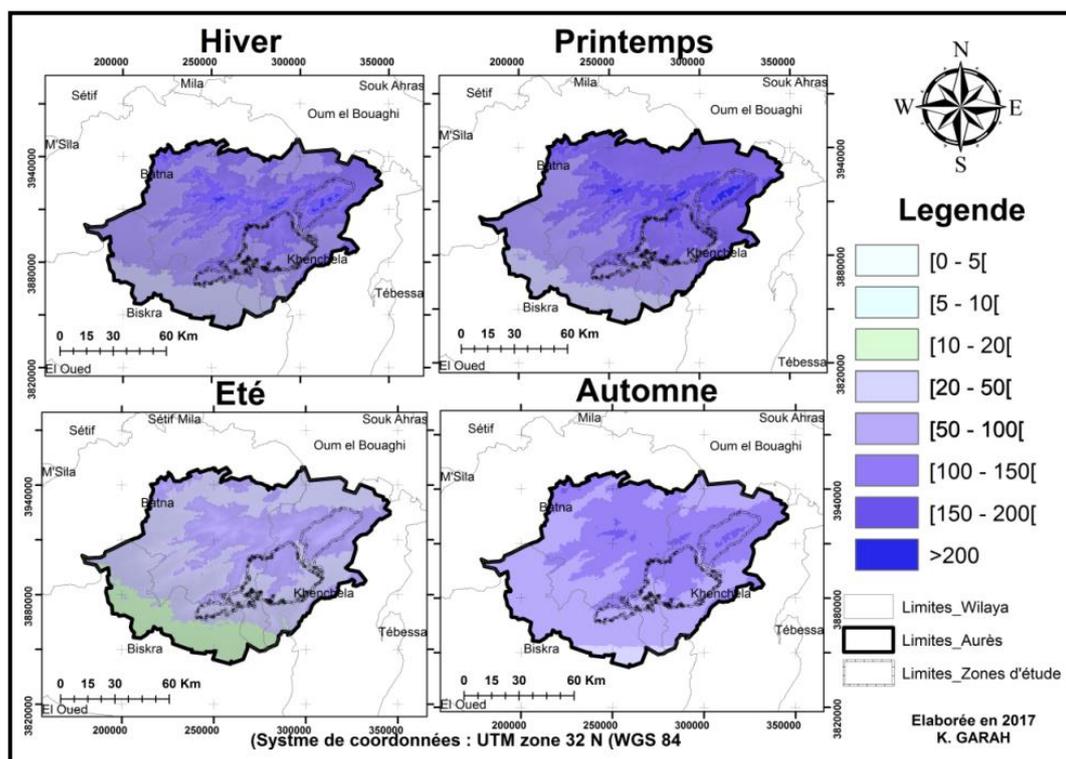


Figure 17. Carte de distribution spatiale des hauteurs des précipitations saisonnières de la région des Aurès.

2. Les Températures

2.1. Données classiques

Cette analyse portera essentiellement sur les températures moyennes, minimales, maximales et amplitudes thermiques enregistrées par la station climatique de Batna, par le fait qu'elle dispose exclusivement d'une série complète et longue, allant de 1953 jusqu'à 2014.

La série de températures de la station de référence est divisée en deux périodes de 30 ans pour chacune, afin de réussir une analyse diachronique de ce paramètre climatique.

Avec une température moyenne annuelle de 13,93 °C, les données disponibles soulignent l'existence de deux saisons bien marquées et bien distinctes, ce qui correspond au climat méditerranéen.

Une saison chaude qui s'étale sur 6 mois de mai à octobre, et qui enregistre une température maximale durant le mois de juillet avec 24,94 °C et un maximum absolu de 33,84 °C.

Une saison froide qui s'échelonne sur 6 mois allant du mois de novembre jusqu'à mois d'avril, marquée par des températures mensuelles les plus basses enregistrées notamment en

CHAPITRE II : Caractérisation climatique de la région des Aurès

mois de janvier avec une valeur minimale moyenne de l'ordre de 4,84 °C et un minimum absolu de - 0,06 ° C.

L'analyse diachronique des différents paramètres thermiques du tableau 8 montre une augmentation de la température de 30 dernières années par rapport à la période ancienne allant du 1953 jusqu'à 2014.

Tableau 8. Températures moyennes, minimales, maximales et l'amplitude thermique de la station de Batna.

Station de Batna		Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jll	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
Températures minimales (°C)	[1953-1983]	- 0,01	0,45	2,14	4,51	7,95	12,4 8	15,5 6	15,5 3	12,5 1	7,77	3,28	0,71	6,91
	[1984-2014]	- 0,11	0,29	2,67	5,27	9,55	14,1 4	16,9 5	16,7 7	13,9 4	9,71	4,57	1,20	7,91
	[1953-2014]	- 0,06	0,37	2,41	4,89	8,75	13,3 1	16,2 6	16,1 5	13,2 2	8,74	3,93	0,96	7,41
Températures moyennes (°C)	[1953-1983]	4,98	6,04	8,21	11,1 3	15,5 1	20,4 9	24,4 4	23,9 9	19,8 9	13,7 9	9,03	5,71	13,6
	[1984-2014]	4,63	5,66	8,59	11,8 9	16,7 5	22,1 1	25,4 8	25,0 1	20,5 3	15,6 6	9,61	5,67	14,3
	[1953-2014]	4,81	5,86	8,39	11,4 9	16,1 0	21,2 6	24,9 4	24,4 8	20,2 0	14,6 8	9,31	5,69	13,9
Températures maximales (°C)	[1953-1983]	10,0 3	11,5 9	14,3 5	17,3 6	22,7 6	28,5 8	33,1 3	32,2 9	27,1 4	20,3 3	14,6 2	10,6 7	20,2
	[1984-2014]	11,0 0	12,5 5	15,7 9	19,3 8	24,9 0	30,9 4	34,5 5	34,1 0	28,4 7	23,0 9	16,2 9	11,7 6	21,9
	[1953-2014]	10,5 2	12,0 7	15,0 7	18,3 7	23,8 3	29,7 6	33,8 4	33,2 0	27,8 0	21,7 1	15,4 5	11,2 2	21,1
Amplitude thermique (°C)	[1953-1983]	10,0 4	11,1 5	12,2 1	12,8 5	14,8 1	16,1 1	17,5 7	16,7 6	14,6 3	12,5 6	11,3 3	9,96	
	[1984-2014]	11,1 2	12,2 6	13,1 2	14,1 1	15,3 5	16,7 9	17,6 0	17,3 3	14,5 4	13,3 7	11,7 2	10,5 6	
	[1953-2014]	10,5 8	11,7 0	12,6 6	13,4 8	15,0 8	16,4 5	17,5 8	17,0 5	14,5 8	12,9 7	11,5 2	10,2 6	

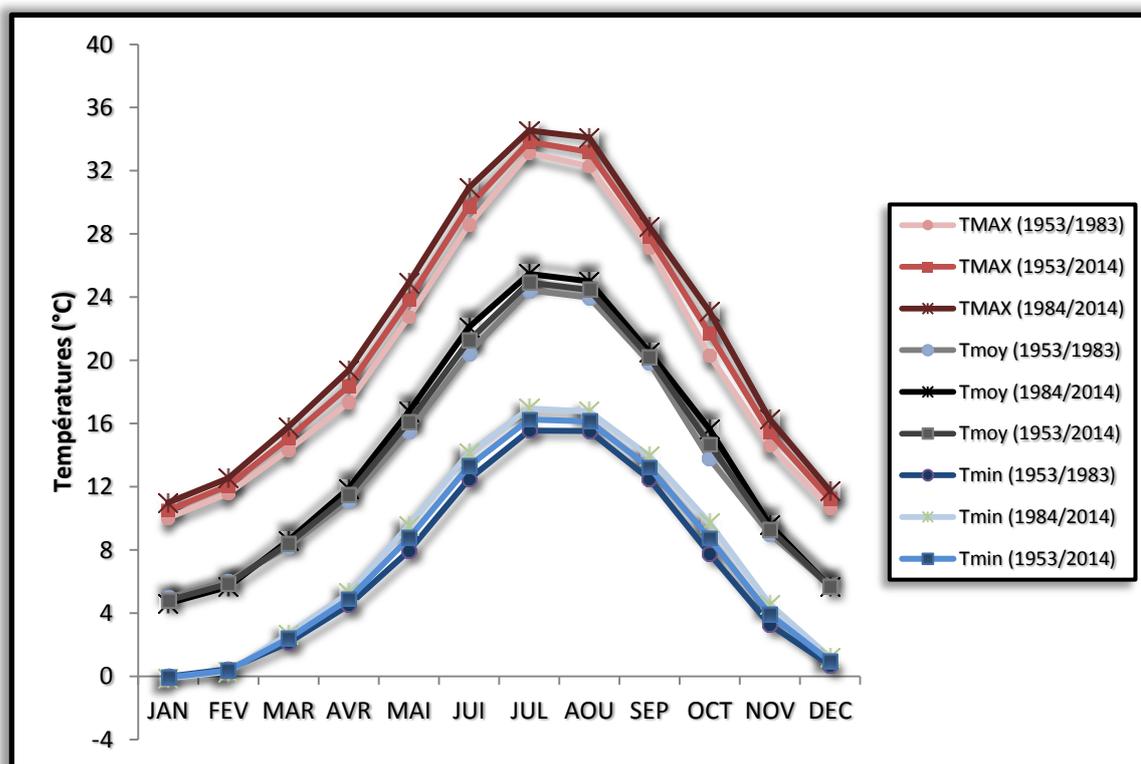


Figure 18. Evolution de la température de la station météorologique de Batna.

Quant à l'amplitude thermique qui est la différence entre la température maximale moyenne et la température minimale moyenne, des valeurs entre 10 et 17 °C sont enregistrées. Bien que celle-ci soit plus importante en été, elle est restée sensiblement stable pendant la période récente de l'étude (1984-2014) par rapport à la période 1953 – 1983.

En contrepartie, les valeurs les plus basses sont observées en hiver, et présentent une augmentation aux alentours de 1 °C.

Il ressort aussi de l'analyse diachronique de l'amplitude thermique que l'augmentation la plus importante est enregistrée pour le mois d'avril, celle-ci a passé de 12,58 °C à 14,11 °C.

L'observation de l'évolution interannuelle des variables thermiques montre que celles-ci présentent une tendance à l'augmentation. Cette dernière étant plus accentuée pour les températures maximales, qui quant à elles présentent des valeurs très supérieures à la moyenne exclusivement à partir des années 1990. Ces résultats coïncident parfaitement avec les conclusions de Nouaceur et *al.* (2013) qui ont évalué le changement climatique en Algérie tout en considérant toutes les stations météorologiques tout au long du littoral algérien.

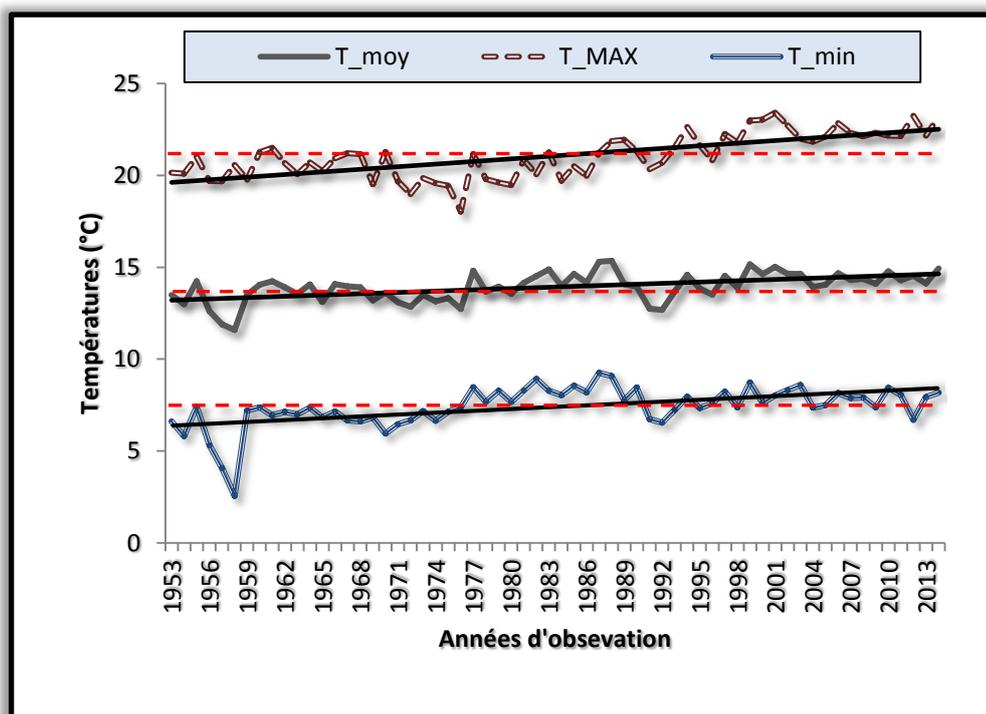


Figure 19. Evolution interannuelle de la température moyenne, minimale et maximale.

2.2. Données spatialisées

Comme pour les précipitations, les températures interpolées correspondent aux différentes couches issues de *Worldclim*.

En moyennant les douze couches des températures moyennes, puis celles relatives aux températures minimales, enfin des températures maximales, nous obtenons respectivement les cartes de la figure 20, 21 et 22.

Le résultat du traitement numérique de ces cartes se résume dans le tableau 9.

Tableau 9. Récapitulatif des principaux paramètres statistiques des variables thermiques de la région d'étude.

	Valeur minimale	Valeur maximale	Moy	CV (%)
T moy	7,33	22,04	14,5	30 %
T min	0,92	16,03	8	61 %
T MAX	13,8	28,1	21	22 %

Pareillement au paramètre précipitations, les températures montrent une variabilité spatiale tridimensionnelle, selon un gradient tant longitudinal que latitudinal et altitudinal. Les cartes exposent une évolution régressive des températures de l'est en ouest, du nord au sud, et de haute à basse altitude.

Cette évolution étant plus irrégulière et plus variable pour les températures minimales qui comptent un coefficient de variation le plus élevé (61 %), par rapport aux températures maximales qui sont plus stables avec un coefficient de variation de l'ordre de 22 %. Le coefficient de variation de 30 % enregistré pour les températures moyennes, indique que de la région d'étude possède une homogénéité thermique moyenne.

En moyenne la région d'étude est soumise à des températures moyennes allant de 7 jusqu'à 22 ° C.

Quant aux températures extrêmes, des températures minimales de la région d'étude varient entre 0,9 °C et 16 °C, alors que les températures maximales oscillent entre 13,8 °C et 28,1 °C.

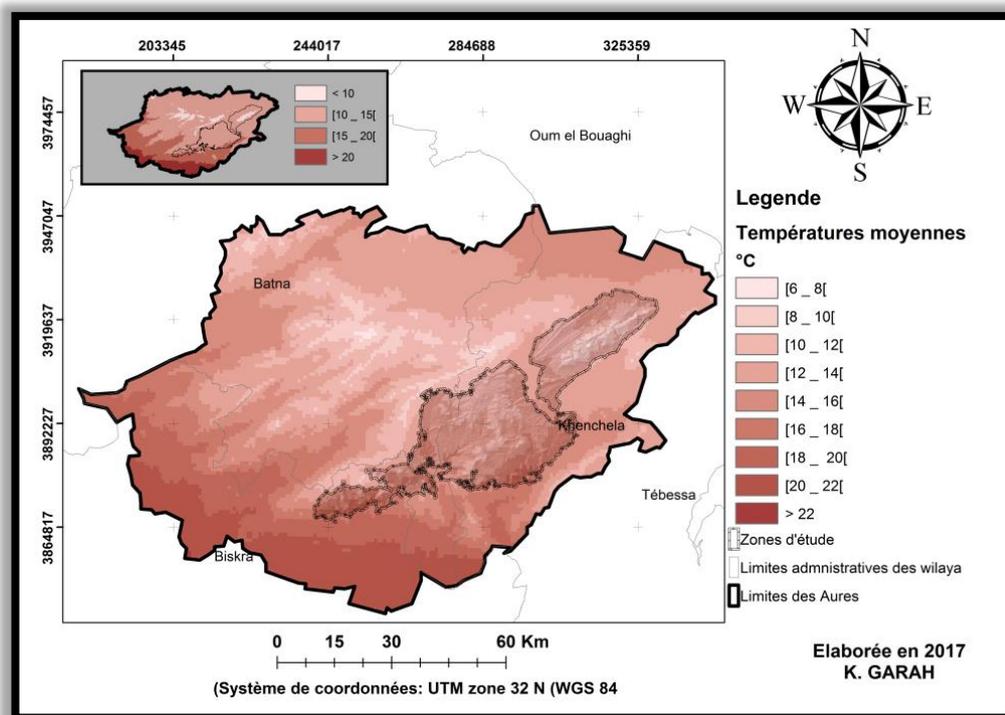


Figure 20. Carte de distribution spatiale des températures moyennes de la région des Aurès.

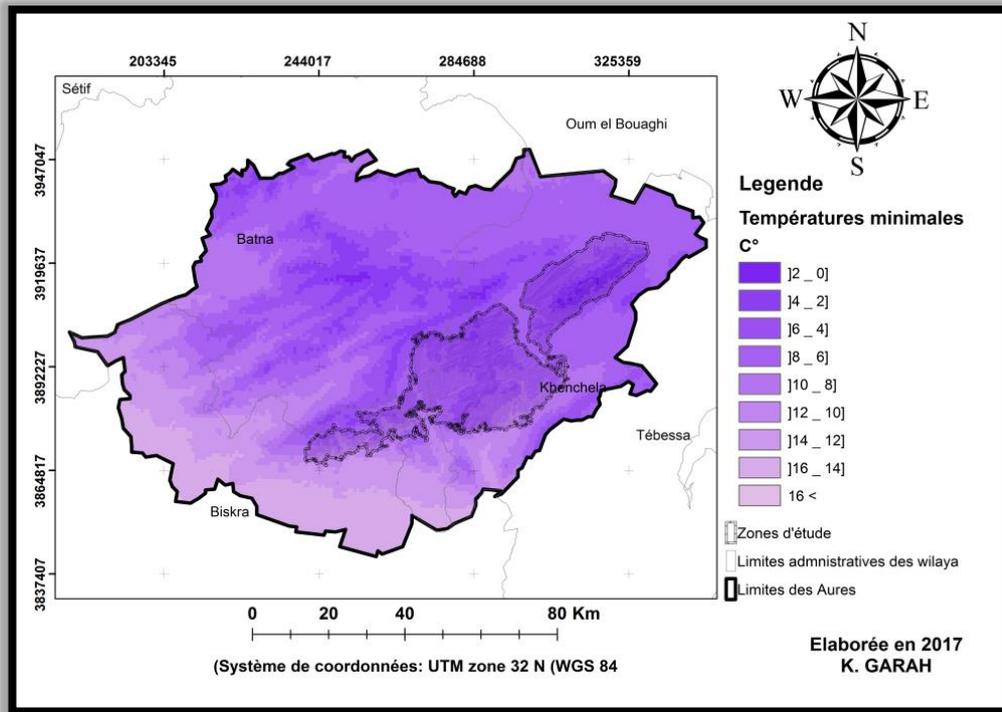


Figure 21. Carte de distribution spatiale des températures minimales de la région des Aurès.

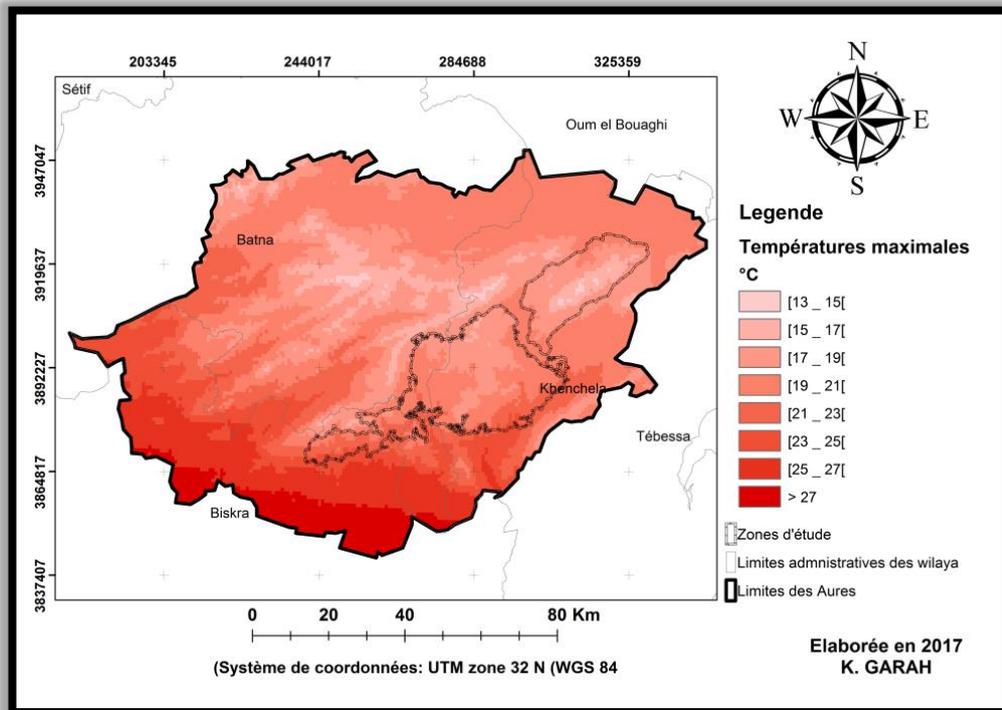


Figure 22. Carte de distribution spatiale des températures maximales de la région des Aurès.

Régime thermique

L'examen de la figure 23 qui présente des cartes traitant de l'évolution spatio-temporelle des températures moyennes, montre une distribution mensuelle selon un rythme régulier et bien marqué. Par conséquent, la station de Batna se caractérise par ;

— Un été chaud avec des températures supérieures à la moyenne annuelle, un semestre de températures modérées, sensiblement plus basses au printemps qu'en automne et une saison hivernale froide avec des températures inférieures à la moyenne annuelle.

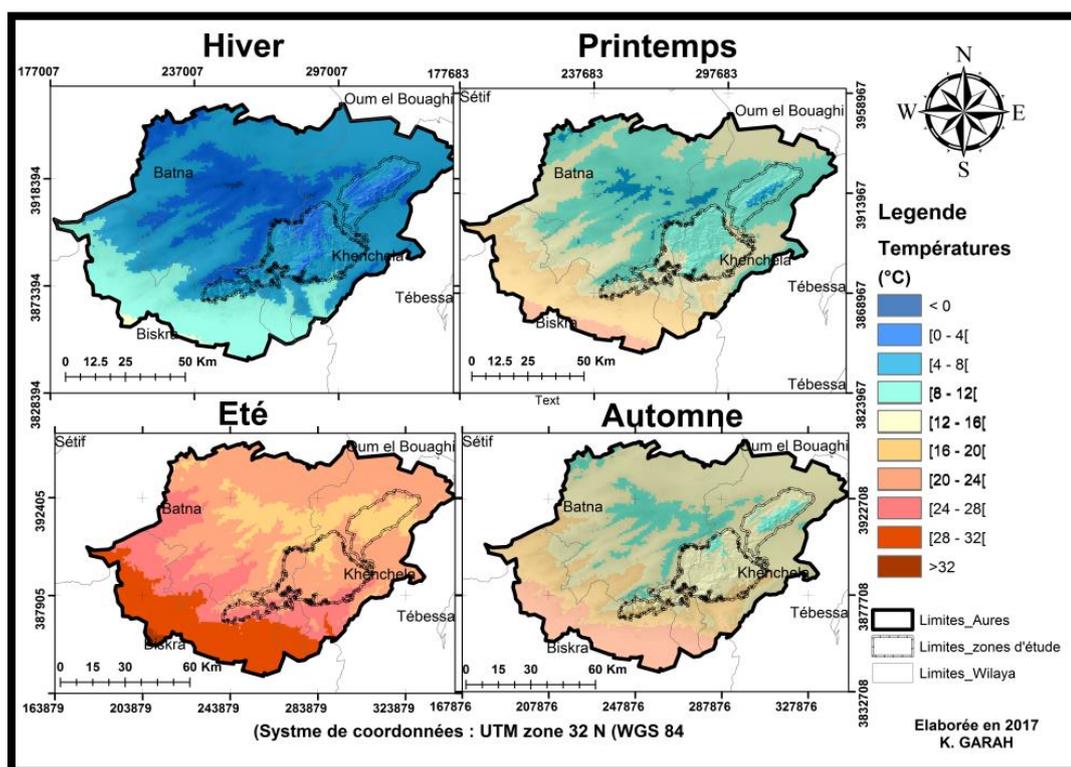


Figure 23. Cartes d'évolution spatiale et saisonnière des températures moyennes de la région des Aurès.

3. Synthèse climatique

Tous les facteurs climatiques sont liés les uns aux autres tout en agissant d'une façon conjuguée pour créer des milieux bioclimatiques.

La répartition intra-annuelle des précipitations ainsi que les variations de la température constituent en particulier deux éléments climatiques indissociables, à la base desquels plusieurs indices bioclimatiques ont été formulés dans le but de caractériser les climats.

3.1. Données classiques

Indice xérothermique de Bagnouls et Gausсен

Les données climatiques de la station de Batna pour la période 1953/2014 ont servi à la détermination et l'analyse de la durée de la saison sèche des deux périodes mises en comparaison, à savoir (1953/1983) et (1984/2014), selon *Bagnouls et Gausсен* qui l'ont définie à partir d'un diagramme ombrothermique, sur la base de l'équation $P=2T$.

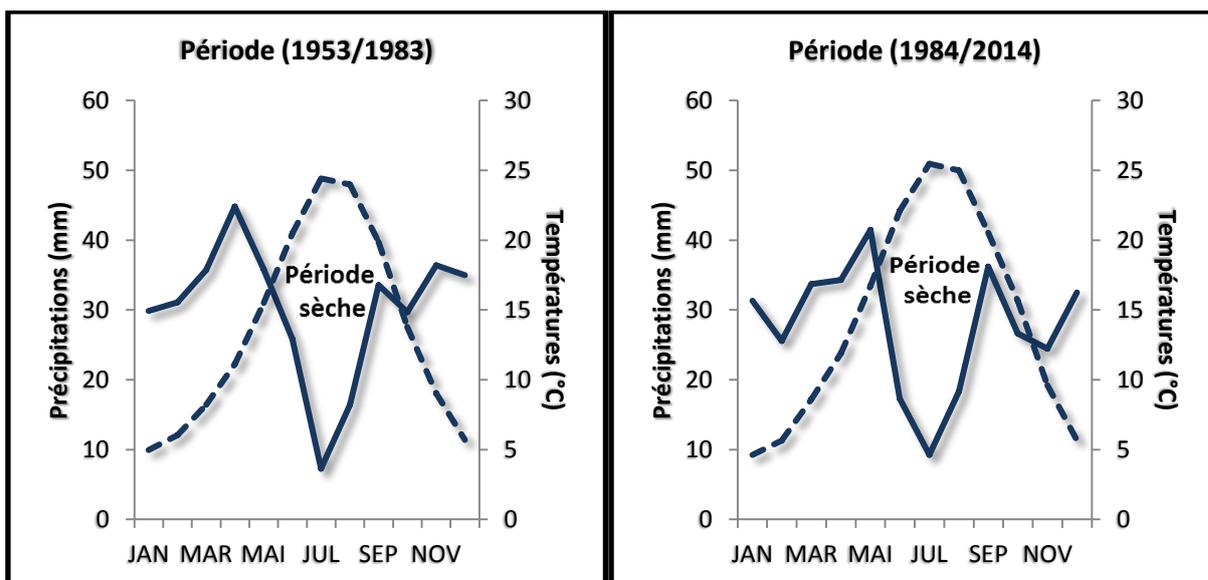


Figure 24. Diagrammes ombrothermiques de la station de Batna pour les périodes (1953/1983) et (1984/2014).

L'analyse de la figure 24 des diagrammes réalisés montre que la station de référence enregistra une période sèche de 4 mois allant de la mi-mai jusqu'à la mi-septembre, pour la période (1953/1983).

Toutefois, elle enregistre un surplus de 1 mois de sécheresse, pour les 30 dernières années. Avec une période sèche qui commence plus tardivement à partir de la fin du mois de mai jusqu'à la fin du mois d'octobre.

D'une manière générale, la période sèche coïncide surtout avec la saison estivale qui se caractérise par des températures très élevées et des précipitations très faibles, entraînant ainsi un épuisement de la réserve utile, et une aridité assez forte par conséquent. L'hiver est par contre une saison froide avec des précipitations plus abondantes.

3.2. Données spatialisées

Sur le plan spatial, les données climatiques ont fait l'objet de plusieurs combinaisons, plus particulièrement entre les précipitations (P), les températures moyennes (T), minimales (Tmin) et maximales (Tmax), selon des modèles mathématiques propres à certains indices bioclimatiques, les plus utilisés en région méditerranéenne.

La présente synthèse bioclimatique a également pour objectif de mettre en évidence une classification des types de climats permettant de délimiter les étages de végétation.

Nombre de mois secs

En se basant sur la définition du mois sec présentée par de Bagnouls et Gaussen, et qui repose sur la relation entre P et 2 T, une carte du nombre de mois secs est élaborée (figure 25).

Le nombre de mois secs est calculé pixel par pixel pour l'ensemble de mois de l'année. De ce fait, pour chaque mois, la valeur 1 est affectée à chaque pixel manifestant P inférieur à 2 T, sinon c'est la valeur 0 qui s'affiche.

Par la suite, on procède à la sommation des douze couches des mois de l'année, ce qui permet d'extraire la carte du nombre de mois secs.

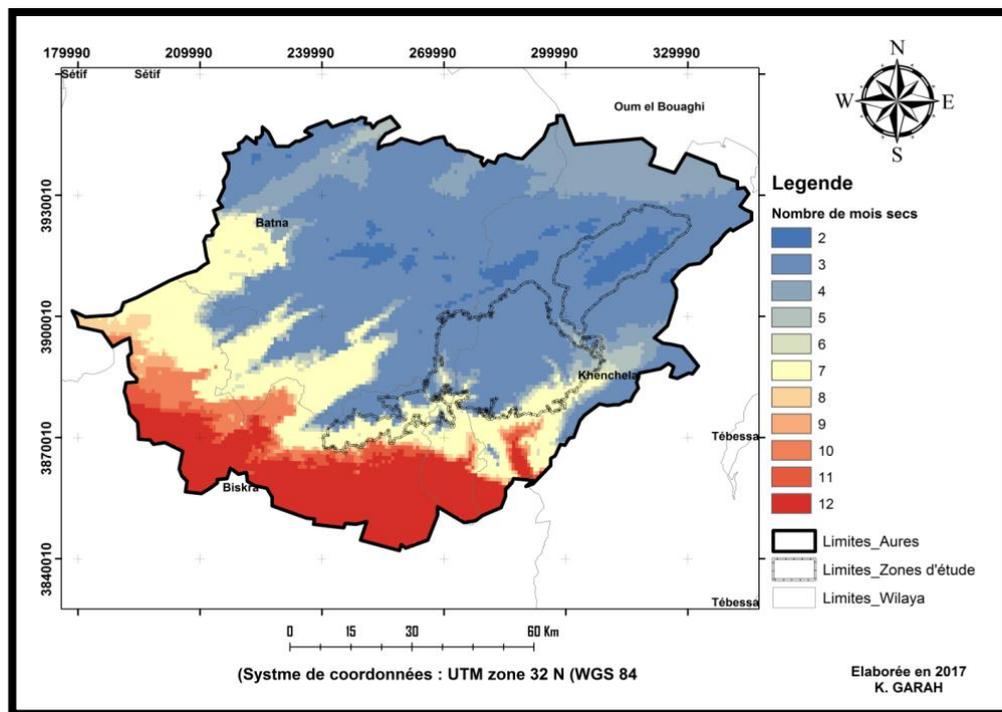


Figure 25. Carte du nombre de mois secs de la région des Aurès.

L'évaluation du nombre de mois secs spatialisés par la carte visible à la (figure 25) et quantifié dans le tableau 20 montre que le nombre des mois secs présente une décroissance du nord-est au sud-ouest, que de la haute à basse altitude.

Le résultat montre que plus de 60 % de la superficie des Aurès est exposé à plus de 6 mois secs, face à 37 % du territoire présentant moins de 6 mois secs. Il est encore à signaler que 22 % de superficie est exposé à une sécheresse persistante sur les 12 mois de l'année, alors que 6 % seulement du territoire est caractérisé par moins de 3 mois secs.

Tableau 20. Quantification de la répartition spatiale du nombre de mois secs de la région des Aurès.

Nombre de mois secs	Pourcentage (%)
2	6
3	1
4	21
5	5
6	3
7	28
8	2
9	2
10	5
11	3
12	22

Indice de Bagnouls et Gaussen

La répartition spatiale de la durée et de l'intensité de la période sèche de la région des Aurès a été déterminée selon la définition de Bagnouls et Gaussen, en utilisant l'expression simplifiée mise en application par Mokhtari *et al.*, (2013) comme suit ;

$$BGIS = (N + 1) / 12 \times \sum_{i=1}^P (2 T_i - P_i)$$

Dont ;

T_i : température moyenne du mois i en °C ;

P_i : précipitation moyenne du mois i en mm ;

N : nombre de mois où 2 T > P. (Mois secs).

Une classification des types de climats a été ensuite conduite en fonction des valeurs obtenues pour l'indice simplifié de Bagnouls et Gausson de la région d'étude. Or, le climat est d'autant moins sec que la valeur de l'indice est plus grande.

Tableau 21. Classification de l'indice Bagnouls et Gausson simplifié de la région des Aurès.

Valeurs de l'indice	Type de climat	Superficie (%)
$350 < \text{BGIS}$	Hyper aride	7
$150 < \text{BGIS} < 350$	Aride	12
$-50 < \text{BGIS} < 150$	Semi-aride	57
$\text{BGIS} < -50$	Subhumide et humide	25

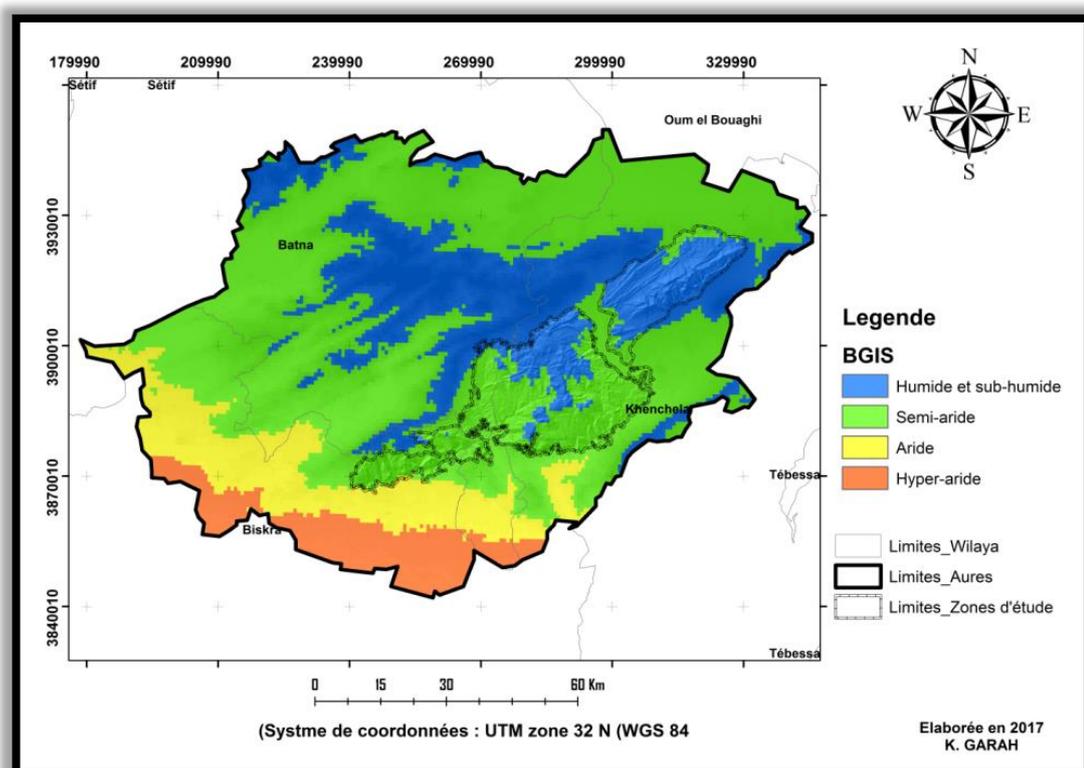


Figure 26. Carte d'indice de Bagnouls et Gausson simplifié de la région des Aurès.

La carte de la figure 26 révèle que toutes les zones autour de l'axe central de la région des Aurès présentent un climat de type semi-aride. Ces zones occupent 57 % de la superficie totale. En revanche, en progressant en altitude le climat devient plus frais et de type subhumide à humide, ce type climatique totalise 25 % des Aurès. 7 % des zones situées au sud des Aurès se caractérisent par un climat hyper-aride. Entre les zones climatiques semi-aride et hyper-aride s'installe un climat aride occupant 12 % du territoire auraisien.

Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne (1926) est une formule qui permet d'évaluer l'intensité de la sécheresse ainsi que de classer les climats et d'analyser leur rapport avec la végétation. Il s'exprime par la relation suivante : $I = \frac{P}{T+10}$

Où ; (P) est la hauteur annuelle des précipitations en mm, (T) représente les températures moyennes annuelles en °C, et (10) est une constante, utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0 °C.

L'indice prend des valeurs d'autant plus élevées que le climat est plus humide et d'autant plus faibles que le climat est plus sec.

La lecture caractéristique de cet indice se fait de la manière suivante ;

$I < 05$ climathyper aride.

$05 < I < 10$ climat aride.

$10 < I < 20$ climat semi-aride.

$20 < I < 30$ climat subhumide.

$30 < I < 55$ climat humide.

La combinaison des données climatiques spatialisées ; thermiques et hygrométriques de la région d'étude selon le système de De Martonne, a permis de produire la carte de la figure 27 qui expose la distribution spatiale des cinq types de climat sur l'ensemble des Aurès, et de quantifier la section correspond à chaque climat tableau 22.

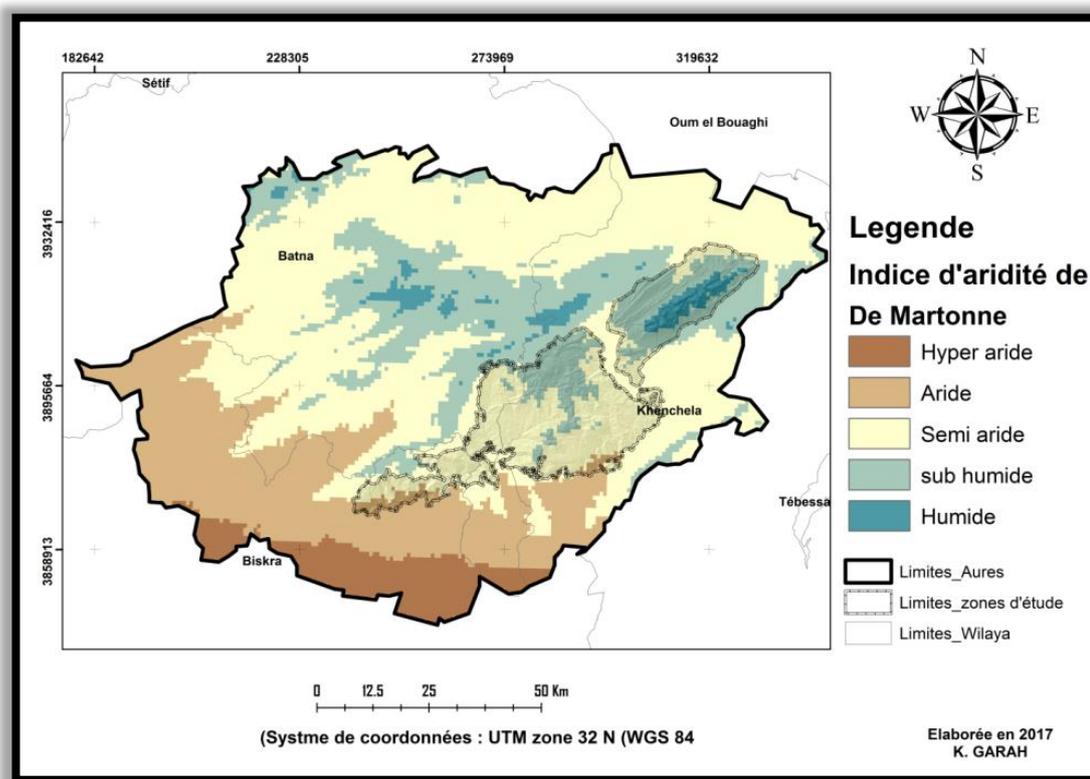


Figure 27. Carte d'indice d'aridité de De Martonne de la région des Aurès.

Tableau 22. Classification de l'indice d'aridité de De Martonne de la région des Aurès.

Type de climat	Superficie (%)
Hyper aride	6
Aride	21
Semi-aride	50
Subhumide	21
Humide	2

Il ressort que la région des Aurès se caractérise par la présence de cinq types de climat depuis l'hyper aride au sud jusqu'à l'humide. Ce type de climat occupe 6 % de l'ensemble des Aurès. Le climat semi-aride est le plus dominant avec 50 % de la superficie des Aurès. On le rencontre à la périphérie et occupe les plaines et les bas versants. Le climat humide et sub humide se confine au centre des Aurès occupe que 23 % de la superficie de la région d'étude. Il se concentre surtout dans les hautes altitudes en zone montagneuse.

Bilan hydrique annuel P-ETP

Afin d'évaluer le bilan hydrique traduisant la différence existant entre la pluviométrie P et l'évapotranspiration potentielle ETP de la région d'étude, un calcul de ETP a été procédé, en utilisant la formule la plus universellement admise ; celle de Thornthwaite (1984 ; in HALIMI, 1980), qui s'écrit comme suit ;

$$ETP = 16 \times \left[\frac{10 \times T}{I} \right]^a \times k$$

Où :

ETP : évapotranspiration potentielle en mm.

T : température moyenne de la période considérée en degré Celsius.

I : Indice thermique annuel donné par la formule $I = \sum_1^{12} i$, ainsi que $i = (t/5)^{1,514}$.

t : étant la température moyenne mensuelle en degré centigrade.

a : indice lié à la température, simplifié par la formule suivante $a = 0,0161 I + 0,5$

k : Coefficient de correction en fonction de la latitude et du mois de l'année (Garah, 2013).

Le calcul du bilan hydrique en figure 28 démontre le déficit hydrique auquel est soumise la région des Aurès. Ainsi, les valeurs élevées de **P – ETP (mm)** indiquent un déficit hydrique amoindri.

De ce fait le résultat montre que la région d'étude est exposée à un déficit annuel qui s'accroît d'autant plus aux basses altitudes, qu'au sud-ouest de région.

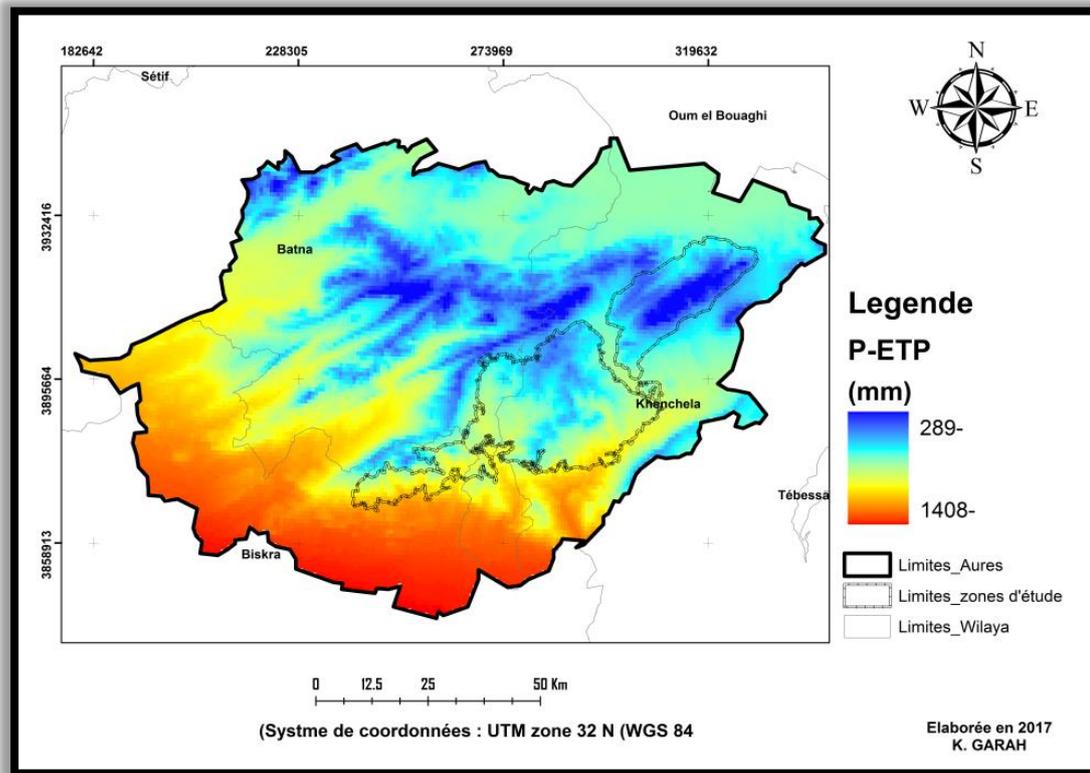


Figure 28. Carte du bilan hydrique annuel de la région des Aurès.

Conclusion

Les principales tendances spatio-temporelles des éléments de climat pris pour analyse statistique et cartographique du climat général de la région des Aurès, sont synthétisées comme suit :

Sur le plan spatial, cette étude nous a permis d'observer une variabilité bioclimatique tridimensionnelle, tant longitudinale que latitudinale et altitudinale, et de distinguer ensuite trois zones bioclimatiques bien distinctes, qui s'installent successivement autour d'un axe central caractérisé par un type climatique humide à subhumide. Soit la zone à climat semi-aride qui prédomine la région, suivi la zone à climat aride et enfin hyper-aride.

Sur le plan temporel intra-annuel, la région des Aurès se caractérise par un climat méditerranéen défini par deux saisons bien distinctes ; une saison estivale longue et sèche caractérisée par les faibles précipitations et les fortes températures, s'étalant en moyenne sur 6 mois, ainsi qu'une saison hivernale courte, humide et froide, caractérisée par une irrégularité pluviométrique.

Les écarts thermiques montrent clairement la rigueur du climat en Aurès. Janvier étant le mois le plus froid, alors que le mois le plus chaud est juillet.

Sur le plan temporel interannuel, le climat des Aurès montre une fluctuation des paramètres climatiques d'une année à une autre. À l'instar des pays du bassin méditerranéen, le climat de l'Algérie est en train de subir des changements. Dans ce contexte, et bien que les données climatiques disponibles à l'échelle de la région d'étude sont moins que suffisantes, nous avons pu situer ce changement climatique dans un cadre régional.

L'observation de l'évolution des différents paramètres climatiques utilisés pour cette étude ainsi que leur analyse diachronique montrent une décroissance des pluies par rapport à la période la plus ancienne de l'étude, avec une tendance à l'augmentation au cours de ces dernières années et une hausse des températures moyennes et ses dérivées, surtout pour les maximas.

CHARITRE III

Caractérisation dendrométrique et
dendrochronologique du pin
d'Alep Aurasien

Introduction

Appréhender la réaction de la végétation aux fluctuations environnementales est crucial pour la prédiction de la réponse des écosystèmes aux changements climatiques (Chapin *et al.*, 1997).

Ces changements de climat affectent les espèces végétales en général et les arbres en particulier. Par conséquent, ces derniers sont susceptibles de présenter des réactions multiples, traduits par des changements importants dans leur répartition géographique, leur productivité et leur phénologie (Parmesan et Yohe, 2003 ; Thuiller *et al.*, 2008).

La région méditerranéenne compte parmi les régions les plus affectées par ces changements climatiques. Les écosystèmes forestiers méditerranéens sont principalement colonisés par le pin d'Alep. Dans ce sens, de nombreuses études se sont portées sur cette essence forestière et sa réponse aux changements climatiques qui prévalent la région. La plupart de ces études ayant trait à la mesure des paramètres des cernes de croissance et à l'analyse rétrospective des relations accroissement/climat par l'approche dendrochronologique.

Parmi ces études, nous citons les travaux de recherches de Rathgeber (2002), Rathgeber *et al.* (2005), Vennetier *et al.* (2005), Guiot *et al.* (2007) et Girard *et al.* (2011) menées en France, les travaux de Papadopoulos *et al.* (2001, 2009) en Grèce, Attolini *et al.* (1990) en Italie, El khorchani (2006, 2013) en Tunisie, et celles de De Luis *et al.*, (2009), Sánchez-Salguero *et al.* (2010, 2012), Olivar *et al.* (2012, 2015) en Espagne. Celles-ci ont révélé une forte hétérogénéité des résultats, qui varient d'un site à un autre.

Bien que les écosystèmes forestiers algériens fassent partie intégrante de la région méditerranéenne où le pin d'Alep constitue un capital forestier majeur et occupe des étages bioclimatiques très variées (Bensaid, 1995), rares sont les études dendrochronologiques qui portent sur cette espèce dans l'Algérie en général et dans la région des Aurès en particulier, sachant que cette dernière région renferme les pinèdes à pin d'Alep les plus importantes au niveau national. A notre connaissance, ces études se limitent aux seuls travaux de Safar (1994), Garah *et al.* (2016), et Sarmoum *et al.* (2016).

De ce fait, le présent chapitre a trait à l'appréciation des particularités du pin d'Alep situé dans la partie orientale de la région des Aurès, à travers la conduite d'une contribution à l'évaluation des potentialités sylvicoles ainsi qu'à l'analyse rétrospective des cernes de croissance d'un certain nombre de pins d'Alep échantillonné à partir des pinèdes aurasiennes.

L'objectif principal de cette recherche est de présenter les caractéristiques dendrométriques de la pinède aurasienne dans son état actuel, et d'étudier les tendances dans l'évolution de la croissance radiale, tout en mettant l'accent sur sa réponse vis-à-vis du climat régional.

La croissance individuelle des arbres est un processus majeur de la dynamique forestière (Clark et Clark 1999). Sa compréhension est indispensable à la modélisation de la dynamique des populations d'arbres et des forêts.

Une attention particulière a été accordée à l'identification et à l'analyse des années caractéristiques de croissance.

Par la fin, nous visons avoir des résultats comportant des éléments clés qui aideraient les acteurs de la gestion des ressources naturelles à la planification dans le cadre de développement durable, pour faire face aux changements climatiques actuels et futurs.

Matériel et méthodes

1. Stratégie d'échantillonnage et acquisition de données

Dans le cadre de cette étude, deux campagnes d'échantillonnage ont été effectuées durant l'année 2015. La première au cours des mois d'Avril et de Mai et une deuxième en plein été pendant le mois de Juillet et d'Août.

Le Protocole d'inventaire dendrométrique et dendrochronologique est basé sur un type d'échantillonnage selon un transect allant du nord-est du massif de Ouled Yagoub jusqu'au sud-ouest du massif des Beni Imloul.

Equitablement réparties entre les deux sites, les douze placettes temporaires inventoriées sont de forme carrée, de 30 mètres de côté, espacées variablement de 200 m à 15 km.

Les placettes de 900 m² de surface, servants d'unité d'échantillonnage, ont été repérées approximativement et préalablement sur image satellitaire du programme *Google earth pro*, à partir duquel nous avons relevé des coordonnées géographiques provisoires pour chaque placette.

L'emplacement approximatif de la placette a été fixé à l'aide d'un récepteur GPS (*Global Positioning System*). Le choix final a été effectué sur terrain, sur la base ; de la représentativité des placettes, tout en évitant les zones perturbées ou en lisière, mais aussi de l'accessibilité du terrain, de point de vue de la configuration du relief et de sécurité.

Après délimitation de la placette, marquage et numérotation de tous les arbres inclus, des variables dendrométriques ont été mesurées, un matériel dendrochronologique a été prélevé, et des déterminations stationnelles ont été consignées.

Quant aux paramètres stationnels qui décrivent le milieu de croissance du pin d'Alep dans chaque placette ; nous avons noté les coordonnées géographiques, la végétation qui y existe, et les variables de nature topographiques et édaphiques les plus déterminantes. Il s'agit de l'altitude, de l'exposition et de la pente, ainsi que l'estimation visuelle de la qualité du sol en matière de profondeur, des affleurements rocheux, et de la litière.

Les mesures dendrométriques ont porté essentiellement sur la détermination des diamètres (à l'aide du compas forestier) et des hauteurs (à l'aide du relascope de BITERRLICH). Dans les détails, nous avons mesuré les variables dendrométriques suivantes ;

- Le diamètre à 1,30 m pour tous les arbres à diamètre supérieur ou égal à 5 cm.
- Les hauteurs totales des 9 plus gros arbres.
- La recherche et la détermination de l'arbre de surface terrière moyenne. Il correspond à la moyenne quadratique des diamètres des arbres du peuplement ;

$$dg = \sqrt{\sum_{i=1}^n di^2 / n}$$

Dont ; dg est le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne, di est le diamètre de tous les arbres de la placette à 1,30 m, n c'est le nombre d'arbres de la placette.

L'arbre de surface terrière moyenne et les 6 plus proches arbres ont fait ensuite l'objet des mesures suivantes ;

- La hauteur totale.
- Le diamètre à 0,30 m.
- Le diamètre à mi-hauteur, estimé par le relascope de BITERRLICH.
- Le diamètre du houppier par projection de ce dernier et mesure des distances qui correspondent aux rayons.
- La distance entre l'arbre de surface terrière moyenne et les 6 plus proches arbres,
- L'âge, estimé par un sondage à la tarière de Pressler.

Au niveau de chaque placette, 10 à 12 arbres sont sélectionnés pour faire l'objet d'un carottage à cœur à raison de deux carottes par arbre. Ces carottages sont orientés à 180 ° l'un de l'autre perpendiculairement à l'axe du tronc et parallèlement à la courbe de niveau.

La sélection a été effectuée sur la base d'un certain nombre de critères dendrochronologiques, notamment l'état sanitaire et la position sociale. Le choix s'est porté sur des arbres apparemment sains (à port de morphologie normale, dépourvu de cicatrices, etc.), appartenant à l'étage dominant et co-dominant pour s'affranchir de la variabilité de la croissance liée à l'âge et à la position sociale tout en évitant les sujets qui se trouvent dans des conditions particulières.

Les prélèvements ont été effectués à une hauteur voisine à 1m 30 du sol. Cette hauteur varie légèrement selon les particularités individuelles de chaque tronc. Au total, 120 Arbres ont été initialement sondés.

Chaque carotte a été conservée isolément dans des tubes en papier « portes carottes terrain », portant un identifiant alphanumérique indiquant le nom du site ainsi que le numéro de la placette, de l'arbre et de l'échantillon, la direction du prélèvement ainsi que la date de prélèvement.

Après leurs séchages, en guise de préparation de l'échantillon, les carottes envoyées en laboratoire ont d'abord été montées sur des supports en bois où est ménagée une gouttière, puis ils ont été polis à l'aide du papier émeri à grain de plus en plus fin, enfin et afin d'accentuer le contraste entre le bois initial et le bois final nous avons appliqué de l'huile de lin.

Sous une loupe binoculaire (40x), une datation « visant à attribuer à chaque cerne son année d'élaboration, partant du fait que la dernière année à cerne complet sous écorce est connue « 2014 », puis une interdatation visuelle « consistant à comparer deux à deux les carottes issues d'un même arbre, puis à comparer toutes les carottes du peuplement les unes aux autres », ont été effectuées.

La largeur des cernes annuels de croissance des carottes échantillonnées a été mesurée à l'aide du programme « *ImageJ* » (<http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/guide/index.html>), avec une précision de 0,01 mm.

La qualité de la datation a été vérifiée grâce à l'interdatation statistique procédée par le programme *COFECHA* (Holmes, 1983). Ce dernier constitue un outil d'aide à la prise de

décision, par l'identification des éventuelles erreurs de datation et les problèmes de mesures sur des séquences de cernes. De ce fait, il génère entre autres une liste contenant tous les problèmes potentiels indiquée par les faibles corrélations. Après vérification et confirmation des erreurs, des corrections demandées par le programme ont été apportées.

2. Analyse de données

2.1. Les variables dendrométriques transformées

Des variables transformées qui peuvent être dérivés des mesures dendrométriques de base, et qui décrivent quelques attributs du peuplement étudié, sont définies ci-dessous, en se référant aux manuels classiques de dendrométrie ; notamment celui de Rondeux (1993).

A partir des données collectées sur le terrain, le diamètre moyen (dm), la hauteur dominante ($Hdom$), la densité (N/ha), la surface terrière (G/ha), le facteur d'élancement (f) et le facteur de compétition des houppiers (CCF) ont été calculé afin de comparer les peuplements étudiés.

- Le diamètre moyen (dm) correspond à la moyenne arithmétique des diamètres mesurés à 1,30 m du sol de tous les arbres de la placette. Il se calcule comme suit :

$$dm = \sum_{i=1}^n di/n$$

Dont ; di est le diamètre de l'arbre à 1,30 m du sol, et n est le nombre d'arbres par placette.

- La hauteur dominante ($Hdom$) correspond à la hauteur des arbres ayant le statut social de dominant. Elle est définie comme étant la hauteur moyenne des cent (100) plus gros arbres à l'hectare. Dans notre cas la hauteur dominante des pieds correspond à la moyenne arithmétique des hauteurs totales des arbres les plus hauts appartenant aux 9 plus gros pieds de la placette.
- Le nombre d'arbres (N/ha) à l'hectare définit la densité d'un peuplement et sert à l'étude de production et de croissance. Il se calcule comme suit :

$$N/ha = \frac{n}{S}$$

Où ; n est le nombre d'arbres par placette, et S est la surface de la placette en ares.

- La surface terrière d'un peuplement, habituellement exprimée en m^2/ha , est la surface de toutes les sections transversales des troncs mesurés à 1,30 m du sol, des arbres présents sur un hectare de forêt. Elle permet en réalité d'accéder à d'autres grandeurs importantes, difficiles à appréhender par une mesure simple sur le terrain. Combinée à d'autres paramètres dendrométriques, la surface terrière permet d'estimer avec une précision acceptable le niveau global de concurrence dans le peuplement ainsi que le volume

Elle s'exprime par la formule suivante ;

$$G/ha = 100/4\pi S \sum_{i=1}^n Ci^2$$

Où ; Ci est la circonférence de l'arbre à 1,30 m du sol, et S est la surface de la placette en are.

- Le facteur d'élancement (f), ou facteur de stabilité est défini pour un peuplement par le rapport : H_g/D_g dont ; H_g et D_g étant respectivement la hauteur totale et le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne, exprimés dans la même unité.

Le facteur d'élancement peut prendre différentes valeurs. Plus la valeur du facteur est élevée, plus le peuplement est élancé et instable. D'une manière générale, les valeurs peuvent être classé comme suit ;

$H_g/D_g < 80$, stable

$80 < H_g/D_g < 100$, instable

$H_g/D_g > 100$, très instable

Ces valeurs dénotent des risques par rapport au vent.

- Le facteur de compétition des houppiers CCF « *Crown Competition Factor* » est une mesure de densité axée sur la concurrence des houppiers. Cette mesure est basée sur la relation linéaire — indépendante de l'âge et de la station — qui existe entre le diamètre du houppier dho et le diamètre à 1,30 m d , des arbres du peuplement ; $dho = (a0 + a1 d)^2$

Le CCF d'un peuplement de N tiges supposées fermées et occupant la surface S , est par définition, le rapport exprimé en pourcentage, de la somme des MCA « *Maximum Crown Area* » des arbres du peuplement à la surface totale des projections de cime de ses arbres (assimilée à la surface du peuplement) :

$$MCA = \frac{\pi \times dho^2}{4}$$

$$CCF = \frac{1}{S} \left[\sum_{i=1}^n MCAi \right] 100$$

- Le volume est selon Rondeux (1993) une caractéristique dendrométrique fondamentale de la quantification de la matière ligneuse. Différentes méthodes sont utilisées en vue de détermination du volume d'un arbre, elles sont le plus souvent divisées en méthodes directes et estimation indirecte au moyen de tarifs de cubage. Compte tenu de la forme générale de l'arbre, plusieurs expressions dendrométriques théoriques ont été proposées.

Par le fait que la forme des troncs des pins d'Alep étudiés est assimilée à un cylindre, la formule de Huber est retenue pour le calcul du volume des arbres par la seule mesure du diamètre médian, comme suit ;

$$V = \frac{\pi}{4} d_m^2 h$$

d_m ; diamètre à mi-longueur h

2.2. Les variables dendrochronologiques

Les séries élémentaires retenues ont fait l'objet de quelques analyses statistiques classiquement utilisées en dendrochronologie dans la caractérisation du signal contenu dans les chronologies.

La sensibilité moyenne, le coefficient d'interdatation, l'accroissement moyen annuel, le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 ont été calculés pour chaque arbre puis une moyenne a été calculée pour l'ensemble des placettes.

- **La sensibilité moyenne (MS) ou Mean Sensitivity** ; permet de définir la variabilité moyenne d'épaisseur entre cernes successifs suivant la formule :

$$MS = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{x-1} \frac{|2 \times (y_{x+1} - y_x)|}{y_{x+1} + y_x}$$

Où « n » représente le nombre total des cernes de l'échantillon, alors que y_{x+1} et y_x sont deux cernes successifs.

Théoriquement la valeur de ce coefficient varie de 0 (pour deux cernes successifs de même épaisseur) à 2 (lorsque l'épaisseur de l'un d'entre eux est nulle autrement dit ; en cas de cerne absent).

Le site étant sensible (sensitive) lorsque le coefficient de sensibilité moyenne est égal ou supérieur à 0,20.

- **Coefficient d'interdatation (R) ou *Coefficient of cross-dating*** ; permet de quantifier le synchronisme entre plusieurs séries de cernes par le rapport suivant :

$$R = \frac{MS_m}{MS_i}$$

MS_m étant la sensibilité moyenne de la chronologie maîtresse.

MS_i est la moyenne des sensibilités moyennes calculées sur les séries élémentaires correspondantes.

Il est à noter que plus la valeur se rapproche du 1 meilleur étant le synchronisme.

- **L'accroissement moyen annuel ou cerne moyen (CM)** ; permet d'évaluer la vitalité d'un peuplement. C'est un paramètre qui reflète la croissance radiale vis-à-vis les facteurs intrinsèques de l'arbre ainsi que les facteurs extrinsèques et notamment le climat. Il s'exprime en (mm/an) par la formule suivante :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Où :

\bar{y} : Cerne moyen.

y_i : Cerne annuel.

n : Nombre total des cernes de l'échantillon.

- **L'autocorrélation du premier ordre (AR1)** ; permet d'estimer la corrélation moyenne entre l'épaisseur de deux cernes consécutifs. Il s'agit d'un indicateur de la persistance du signal environnemental d'une année à la suivante dans l'élaboration du cerne. C'est une corrélation entre la série et la série elle-même décalée d'une année.
- Les années caractéristiques ont été également déterminées pour la région d'étude. Le calcul a été fait par la macro « *POINTER* » développée par Merian (2012) sous le langage de programmation **R** en choisissant un seuil de 10 % d'écart relatif moyen, et de 75 % d'arbres (Becker, 1989 ; *in* Lebourgeois et Merian, 2012).

2.3.Etablissement des chronologies

Des chronologies définissant la croissance diamétrique du pin d'Alep de l'Aurès oriental ont été établies, plus spécialement ; les chronologies dressées à partir des données brutes de largeurs de cernes, et la chronologie résiduelle tracée à partir des données standardisées. Ces dernières données se présentent par des indices de croissance obtenus après standardisation des données brutes des largeurs de cernes par le programme *ARSTAN* (Cook, 1985). Cette opération de standardisation consiste à éliminer le plus possible les bruits de fond non liés à l'effet du climat sur la croissance (Lebourgeois *et al.*, 2010).

La standardisation a été effectuée en utilisant la fonction Spline cubique avec une fenêtre définie à 67 % de longueur de la série. Les indices de croissance sans dimension ont été produits en divisant les valeurs des données brutes (largeurs des cernes en mm) par les valeurs correspondantes de la courbe ajustée.

2.4.Evaluation de l'impact des changements climatiques sur la croissance radiale

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude constitue une étape de réflexion sur les relations croissance – climat. Ceci consiste à évaluer les tendances de l'accroissement présenté par la série des indices de croissance et de les interpréter par l'intermédiaire de quelques paramètres climatiques, tout en mettant l'accent sur la recherche du déterminisme climatique des années de croissance les plus exceptionnelles, précédemment calculées.

Les effets du climat ont été également évalués par les méthodes de calcul de corrélations. Le programme *Dendroclim 2002* (Biondi et Waikul, 2004) a été utilisé pour formuler une

fonction de réponse à travers le calcul de corrélations (coefficients de *Person*) existantes entre les variations interannuelles des cernes et les variables climatiques mensuelles. Ce qui permet de déterminer la nature de la relation et le degré d'influence du climat sur la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude.

Le programme *Dendroclim 2002* permet ainsi de mettre en évidence, grâce à des tests de significativité, les mois des années (n-1) et (n) de croissance qui ont eu le plus fort impact sur la taille des cernes.

De ce fait, les corrélations ont été calculées depuis le mois de Septembre de l'année précédant la croissance (n-1) jusqu'au mois d'Octobre de l'année courante de la formation de cerne (n) sur la période 1972-2014.

3. Données climatiques

Les cernes du pin d'Alep, comme des autres arbres ou végétaux ligneux, ont une épaisseur variable liée en grande partie aux facteurs du milieu parmi lesquels les précipitations et les températures jouent un rôle important (Serre-Bachet, 1992).

De ce fait, cette étude utilise des données climatiques présentées par les précipitations et les températures mensuelles.

Pour les précipitations, une série régionale a été élaborée en faisant la moyenne des données recueillies auprès de neuf stations (Ain mimoune, Tizi Ala, El Hamma, Chelia, Bouhmama, Yabous, Khierane, Medina et FomElgueiss) sur une période de 45 ans allant de 1970 à 2014.

Quant aux températures, nous avons utilisé les seules données disponibles ; celles enregistrées par la station de El Hamma sur la période oscillant entre 1995 et 2014.

Résultats et discussion

1. Contexte écologique de l'échantillonnage

Les caractéristiques écologiques qui ont été consignées pour les sites d'échantillonnage sont représentées dans le tableau 13 qui montre que les placettes échantillonnées couvrent une large gamme de conditions topographiques et pédoclimatiques.

Tableau 13. Caractérisation écologique des placettes d'échantillonnage

Massif	N° placette	Caractères topographiques			Caractères édaphiques		
		Altitude (m)	Exposition	Pente (%)	Sol	Litière	Fragments rocheux
Ouled Yagoub	1	1083	Nord-Est	10	Calcaire	++	-
	2	1050	Nord-Est	25	Calcaire	++	++
	3	1079	Nord-Est	12,50	Calcaire	++	++
	4	1125	Nord-Est	10	Calcaire	++	++
	5	1202	Nord-Est	16,25	Calcaire	+	+
	6	1292	Nord-Est	50	Calcaire	+	++
Beni Imloul	7	1081	Nord-Ouest	20	Calcaire	/	/
	8	1314	Nord-Ouest	15	Calcaire	/	/
	9	1441	Nord-Ouest	32,50	Calcaire	/	/
	10	1460	Nord-Ouest	23,75	Calcaire	/	/
	11	1534	Nord-Ouest	25	Calcaire	/	/
	12	1523	Nord-Ouest	10	Calcaire	/	/

Pour que notre échantillon soit aussi représentatif que possible ; les placettes ont été installées dans diverses situations topographiques, nous avons considéré ;

- Des altitudes qui s'échelonnent entre 1000 m à plus de 1500 m.
- Des expositions nord-est et nord-ouest, où le pin d'Alep végète d'une manière préférentielle (Kherchouche *et al*,2011).
- Des pentes variant entre 10 % et 50 %.

2. Caractérisation dendrométrique du pin d'Alep de l'Aurès oriental

2.1. Structure du peuplement

2.1.1. Structure globale

La structure diamétrique globale du pin d'Alep de l'Aurès oriental présentée par la figure 29 est caractérisée par son irrégularité, et montre que le peuplement étudié suit une distribution plus ou moins en cloche avec beaucoup d'arbres de petit diamètre et peu d'arbres de gros

diamètre. En effet, la classe des diamètres moyens variant entre 15 et 20 cm est la plus représentée, et argumente ainsi une bonne régénération, alors que les classes des diamètres les plus volumineux ; [50-55[, [55-60[et [60-65[sont peu représentées.

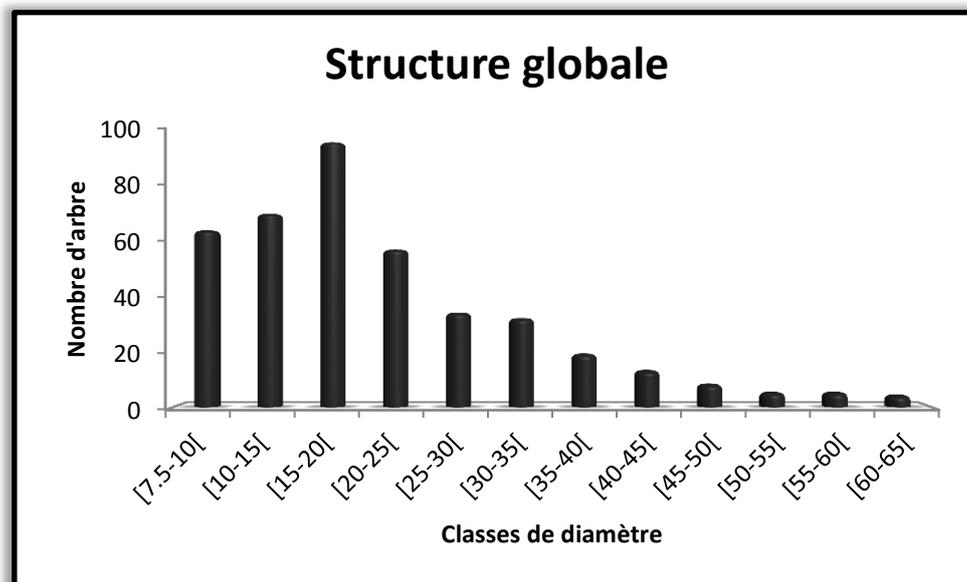


Figure 29. Présentation graphique des pinèdes de la région d'étude.

La comparaison de la structure diamétrique spécifique à la pinède de Ouled Yagoub avec celle des Beni Imloul figure 30 ; montre que pareillement à la structure globale, les différentes catégories de diamètres (de [7,5-10[à [60 à 65 [) sont présentes dans les deux sites d'étude, toutefois une distinction s'observe entre les deux sites où le peuplement des Beni Imloul se montre plus équilibré que celui de Ouled Yagoub qui suit la même distribution que la structure globale.

Il est à noter que l'absence de classes de diamètres faibles et de grands diamètres est la conséquence de la stratégie d'échantillonnage.

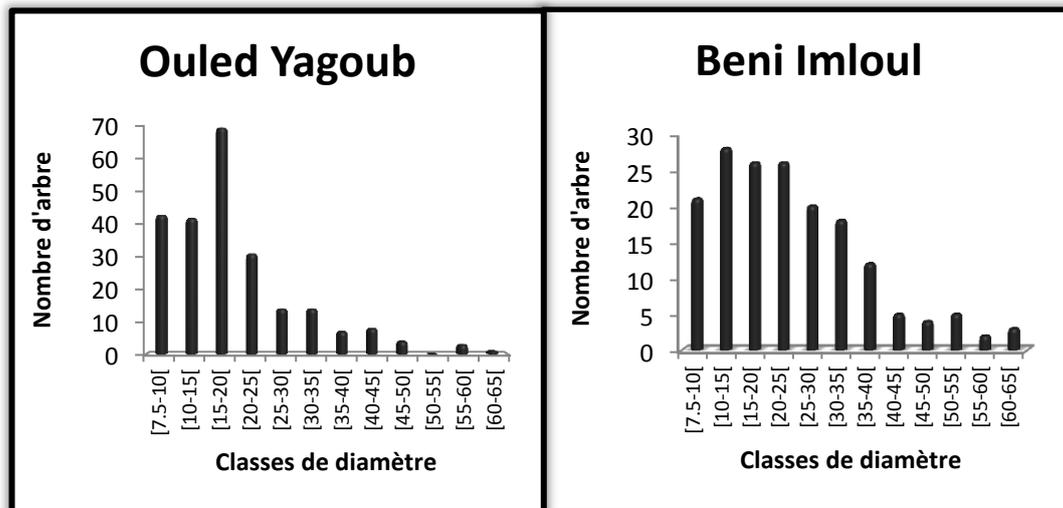


Figure 30. Structure des peuplements par site d'échantillonnage.

2.2. Paramètres statistiques des variables dendrométriques du peuplement (Analyse descriptive)

Les paramètres statistiques des variables dendrométriques mesurées se trouvent récapitulés dans le tableau 14 pour la pinède de Ouled Yagoub et dans le tableau 15 pour le pin du massif des Beni Imloul. Quant aux variables calculées, les paramètres statistiques qui caractérisent la pinède de Ouled Yaoub et des Beni Imloul sont récapitulées respectivement dans le tableau 16 et tableau 17.

Tableau 14. Paramètres statistiques des variables mesurées au sein des placettes à Ouled Yagoub.

	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	CVR (%)
d (cm)	19,36	07,50	60,50	54,83
h dom (m)	12,31	08,00	17,50	24,71
hg (m)	08,33	05,00	11,70	21,91
dg (cm)	16,72	11,00	23,00	25,74

Tableau 15. Paramètres statistiques des variables mesurées au sein des placettes à Beni Imloul.

	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	CVR (%)
d (cm)	23,95	07,50	62,50	53,56
h dom (m)	11,41	05,00	17,25	25,58
hg (m)	09,86	04,70	14,00	26,79
dg (cm)	26,33	14,00	39,00	33,70

Relativement aux variables mesurées, les pins des deux sites présentent sensiblement les mêmes valeurs des paramètres statistiques. La lecture des coefficients de variation de ces derniers montre que les potentialités de la croissance diamétrique sont plus irrégulières entre les différents individus composant les pinèdes des Aurès que la croissance en hauteur.

En moyenne, le pin de l'Aurès oriental est caractérisé par une hauteur dominante de 12 m environ, avec une valeur minimale de 5 m enregistrée à Beni Imloul, et une valeur maximale qui tend vers 17 m enregistrée dans les deux sites d'étude.

La hauteur du pin d'Alep est fonction du facteur héréditaire, ainsi que du facteur écologique lié au milieu dans lequel pousse l'arbre (Nahal, 1962).

Bien que les diamètres des pins de la région d'étude varient entre une valeur minimale de 7,50 cm et une valeur maximale de 60 cm environ ; les pins des Beni Imloul présentent plus de performances en croissance diamétrique avec une moyenne de 24 cm environ par rapport à 19 cm seulement pour les pins de Ouled Yagoub.

Ceci est décrit également par l'arbre de surface terrière moyenne, qui enregistre un diamètre moyen de 26,33 cm à Beni Imloul avec un surplus de 10 cm environ par rapport à Ouled Yagoub (16,72 cm). Avec un coefficient de variation de plus de 33 % à Beni Imloul, l'arbre de surface terrière moyenne peut atteindre une valeur maximale de 39 cm.

Dans ce contexte, Boudy (1952) a considéré le pin d'Alep comme arbre de seconde grandeur dont la taille dépend de la station colonisée ; il s'élève souvent à 20 mètres de hauteur pour un maximum de 3,5 mètres de tour dans les stations les plus favorables, alors qu'il ne dépasse

CHAPITRE III : Caractérisation dendrométrique et dendrochronologique de la croissance de pin d'Alep Aurasien

guère 12 mètres de hauteur sur 1,20 mètre de tour dans les sols mauvais ou médiocres où il se trouve le plus fréquemment.

Tableau 16. Paramètres statistiques des variables calculées au sein des placettes à Ouled Yagoub.

Variables calculées	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	CVR (%)
N/ha	442,59	355,56	555,56	19,54
G/ha	14,17	11,09	20,55	31,30
V m³/ha	25,46	05,84	38,83	52,52
CCF %	77,61	35,03	160,78	58,92
a	05,17	04,56	05,70	09,53
f=h/d	51,39	33,35	68,67	26,25

Tableau 17. Paramètres statistiques des variables calculées au sein des placettes à Beni Imloul.

Variables calculées	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	CVR (%)
N/ha	313,06	178,00	433,33	32,46
G/ha	18,15	9,08	24,57	31,78
V m³/ha	65,75	10,80	138,28	76,86
CCF %	63,40	32,84	102,98	37,90
a	06,30	05,16	08,05	17,84
f=h/d	43,49	25,96	82,65	49,26

Les tableaux 15 et 16 présentent une description synthétique des peuplements étudiés à travers des expressions liées aux notions de densité (N/ha, G/ha, CCF %, a) de stabilité (h/d) et de rendement (volume à l'hectare v). La lecture de ces tableaux fait ressortir ce qui suit ;

La densité au sein des pinèdes de l'Aurès oriental oscille entre une valeur minimale de l'ordre de 178 arbres par hectare enregistré à Beni Imloul et une valeur maximale de l'ordre de

555,56 arbres par hectare enregistré à Ouled Yagoub, avec un espacement variant entre 4,56 m à Ouled Yagoub et 8,05 m à Beni Imloul.

Les faibles valeurs de densité et les valeurs élevées d'espacement entre les arbres enregistrés à Beni Imloul par rapport à Ouled Yagoub seraient due aux actions sylvicoles surtout aux coupes de régénération pratiquées dans les années 1980 pinède des Beni Imloul.

La forte densité à Ouled Yagoub est également exprimée par la concurrence aérienne au niveau des houppiers, où nous avons enregistré un CCF variant entre 35 % et plus de 160 % autour d'une moyenne de l'ordre de 77,61 %.

Le peuplement étudié est stable dans son ensemble, mis à part la valeur maximale du facteur d'élancement ($f=h/d$) enregistrée à Beni Imloul et qui dépasse légèrement la valeur 80 qui présente la limite inférieure de l'intervalle dénotant un risque par rapport au vent, les valeurs enregistrées pour ce facteur d'élancement au niveau des pinèdes de l'Aurès oriental renseignent sur la stabilité des peuplements.

Parmi toutes les variables calculées, c'est le volume par hectare estimé pour le pin d'Alep des Beni Imloul qui présente le coefficient de variation le plus élevé : 76,86 %, indiquant ainsi l'hétérogénéité des performances de productivité au sein de la pinède des Beni Imloul, qui compte des volumes du bois sur pied variant entre une valeur minimale de 10,80 m³/ha et une valeur maximale de 138,28 m³/ha autour d'une moyenne de l'ordre de 65,75 m³/ha.

3. Caractérisation dendrochronologique du pin d'Alep de l'Aurès oriental

3.1. Analyse descriptive des paramètres dendrochronologiques du peuplement

Les principaux paramètres dendrochronologiques enregistrés pour le pin d'Alep de la région d'étude sont inscrits dans le tableau 18, à partir duquel nous tirons ce qui suit ;

Les peuplements de pin d'Alep de l'Aurès oriental se présentent sous forme de futaie irrégulière composée d'arbres de différents âges dépassant parfois 100 ans avec un âge moyen de 50 ans.

Avec un accroissement radial moyen de 2,51 mm, l'arbre de la pinède aurasienne produit de 0,5 à 7,37 mm de bois par an. Cette variabilité de production annuelle est essentiellement conditionnée par les facteurs climatiques. La valeur de la sensibilité moyenne de l'ordre de 0,55 traduit en effet le degré d'influence des variations climatiques interannuelles sur la production du cerne de croissance.

CHAPITRE III : Caractérisation dendrométrique et dendrochronologique de la croissance de pin d'Alep Aurasien

Les données de largeurs de cernes se caractérisent par un coefficient d'autocorrélation du premier ordre élevé (0,40), exprimant ainsi le degré de dépendance entre deux épaisseurs consécutives, la persistance dans les séries chronologiques, et donc la soumission des arbres à une certaine rémanence des conditions antérieures de croissance. L'effet de rémanence est éliminé par la standardisation des largeurs de cerne en indices de croissance.

Le coefficient d'interdatation obtenu pour notre échantillon est de l'ordre de 0,77, ceci reflète un bon synchronisme des fluctuations annuelles entre les individus analysés.

Tableau 18. Principaux paramètres statistiques et dendrochronologiques du pin d'Alep de l'Aurès oriental.

<i>Longueur moyenne des séries (cerne/carotte) « an »</i>	50
<i>Cerne moyen (accroissement moyen du peuplement) « mm »</i>	2,51
<i>Accroissement maximal « mm »</i>	7,37
<i>Accroissement minimal « mm »</i>	0,49
<i>Moyenne des sensibilités moyennes individuelles</i>	0,55
<i>Coefficient d'interdatation</i>	0,77
<i>Coefficient d'auto corrélation du premier ordre</i>	0,40

3.2. Les années caractéristiques

On entend par année caractéristique positive ; une année où les conditions de milieu sont en faveur de la croissance des arbres et plus particulièrement de cerne de croissance, alors que l'année caractéristique négative indique des conditions non favorables à la croissance, et donc un cerne de croissance étroit.

Les années de croissance exceptionnelle sont quantifiées au moyen du programme « **R** » qui les définit à partir du pourcentage positif d'arbres montrant un cerne diagnostique positif ou négatif. Les résultats sont synthétisés et présentés par la figure 31 et par le tableau 19.

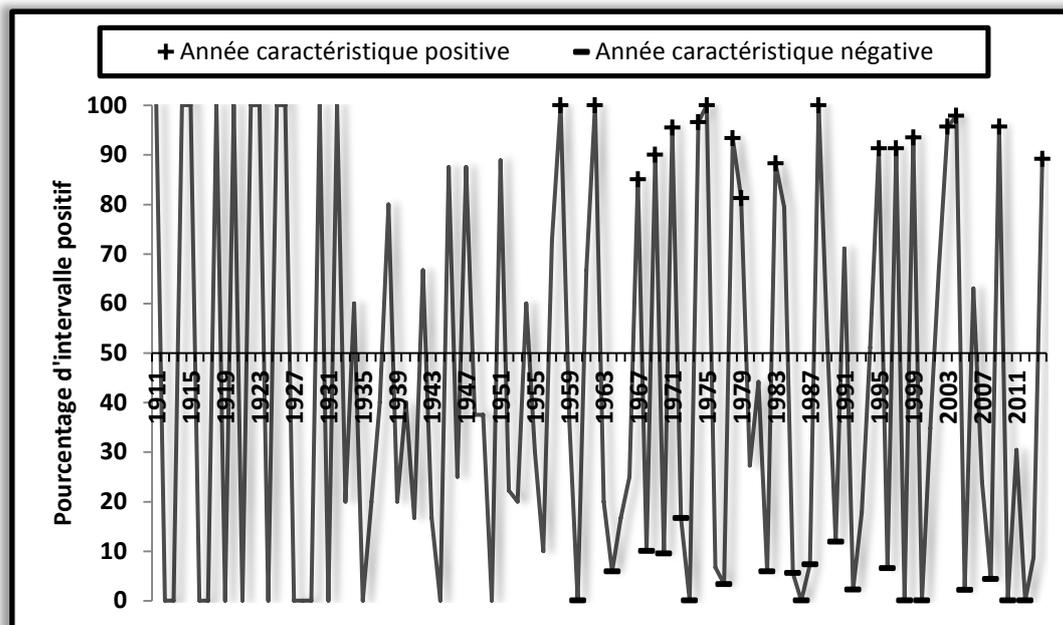


Figure 31. Présentation graphique des années caractéristiques « à partir du fichier de sortie du programme R ».

La figure 31 présente en abscisse les années et en ordonnée le pourcentage d'intervalle positif, en ne considérant des années caractéristiques qu'à partir de l'an 1953 (année commune chez au moins 10 individus; seuil minimum de jugement des années caractéristiques selon Lebourgeois et Merian (2012)).

Il ressort ainsi que sur une période de 63 ans allant de 1953 jusqu'à 2014, 27 années caractéristiques ont été repérées, celles-ci sont sensiblement équitablement réparties entre années caractéristiques positives et années caractéristiques négatives, avec un surplus d'une année en faveur des années favorables à la croissance.

Parmi ces années caractéristiques, 6 sont des années exceptionnelles de croissance chez 100 % des individus analysés. Ces dernières années sont réparties en 4 années caractéristiques positives présentées par des cernes exceptionnellement larges (1958, 1962, 1975 et 1988) et 2 années caractéristiques négatives présentées par des cernes exceptionnellement étroits (2000 et 2012) (tableau 19).

CHAPITRE III : Caractérisation dendrométrique et dendrochronologique de la croissance de pin d'Alep Aurasien

Tableau 19. Années caractéristiques observées pour le pin d'Alep de l'Aurès oriental « à partir du fichier de sortie du programme R ».

Année caractéristique	Nature	Pourcentage (%)
1958	+	100
1960	-	90,91
1962	+	100
1968	-	90
1969	+	90
1971	+	95,45
1973	-	96,43
1974	+	96,55
1975	+	100
1977	-	96,67
1978	+	93,33
1986	-	95,12
1987	-	92,68
1988	+	100
1992	-	93,33
1995	+	91,3
1997	+	91,3
1998	-	97,83
1999	+	93,48
2000	-	100
2003	+	95,65
2004	+	97,83
2005	-	93,48
2009	+	95,65
2010	-	97,83
2012	-	100
2014	+	89,13

Signe + indique une croissance forte, faible sinon.

De ce fait nous remarquons qu'à partir du 21^e siècle aucune année caractéristique positive (pour 100 % des cas) n'a été observée chez le pin d'Alep de la région d'étude, par contre avant le 21^e siècle aucune année caractéristique négative (pour 100 % des cas) n'a été repérée. Ceci témoigne un climat qui aurait devenir plus en plus rude, avec une tendance à la diminution de la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude ces dernières décennies.

Dans leur étude menée sur la croissance radiale du pin d'Alep du massif de l'Ouarsenis, Sarmom *et al.* (2016) ont compté un total de 22 cernes caractéristiques au cours de la période allant de 1967 jusqu'à 2010. Ceux-ci sont prédominés par les années caractéristiques négatives. Avec la considération de l'an 2000 comme année défavorable à la croissance.

Dans ce même contexte, l'année 2000 coïncide avec un épisode de mortalité massive des cèdres de l'Atlas de la région des Aurès en raison de la sécheresse (Kherchouche *et al.*, 2012). Aussi Linares *et al.* (2011) ont noté que les symptômes de dépérissement de cèdre de l'Atlas n'ont attiré l'attention au Maroc qu'à part de l'an 2001. Ces derniers ont également signalé une augmentation des événements de sécheresse et de température depuis les années 1970.

De leur part, Allen *et al.* (2010) ont noté que le stress climatique et le stress thermique depuis 1970, sont à l'origine des mortalités forestières dans le monde.

Pour l'Algérie du Nord, les chercheurs NOAA (2013) ont noté que l'année 2012 a été caractérisée par une succession de vagues de froid pendant la saison hivernale accompagnée de températures de congélation et de la neige, et de canicule exceptionnelle en mois de Juillet et Août.

Les études dendroclimatologiques menées en Afrique du Nord ont démontré que parmi les différents épisodes de sécheresse sévère et récurrente qui ont marqué la région, celle de la période 1999-2002 apparaît être la pire de son genre. Ceci suggère que les conditions sont devenues plus limitantes à la croissance.

3.3. Chronologies obtenues

Les courbes dendrochronologiques obtenues pour le peuplement de pin d'Alep étudié sont exposées dans la figure 32, la figure 33, et figure 34.

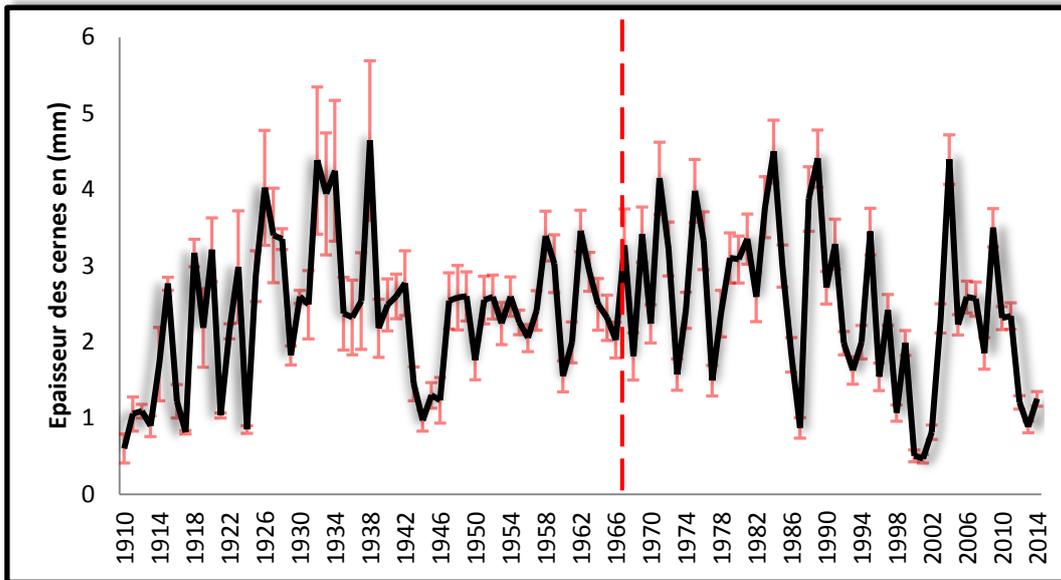


Figure 32. Courbe des épaisseurs brutes des cernes de croissance du pin d'Alep de l'Aurès oriental.

La figure 32 représente la chronologie maîtresse du peuplement sur une période totale allant de 1910 jusqu'à 2014. Celle-ci résulte de la moyenne, année par année, des épaisseurs des cernes de toutes les séries élémentaires, tout en mettant en évidence la forte variabilité interannuelle y compris les variations à long terme dues essentiellement à l'effet de l'âge en tant que signale basse fréquence.

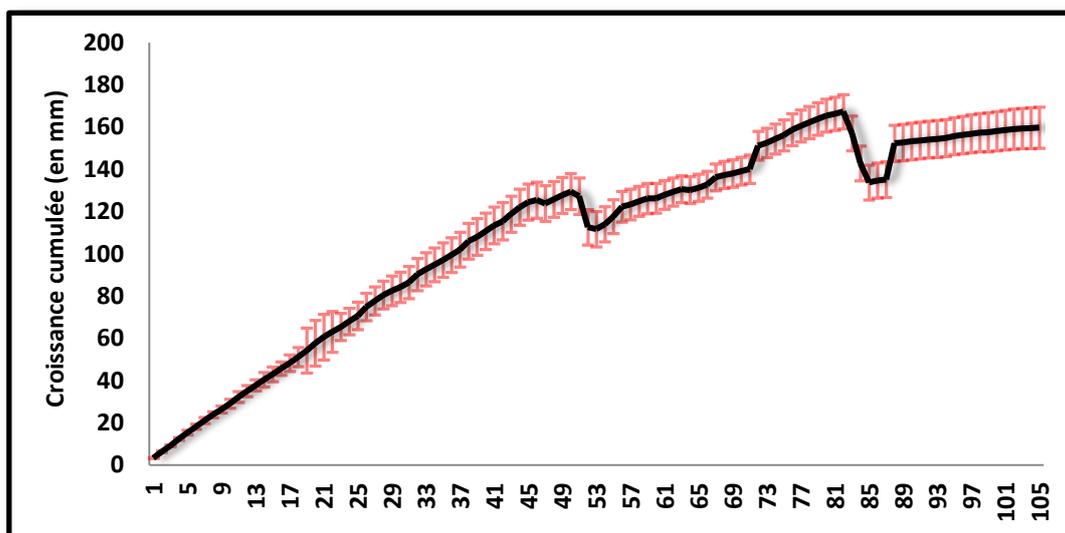


Figure 33. Courbe de l'évolution de la croissance radiale de pin d'Alep de l'Aurès oriental en fonction de l'âge.

La figure 33 expose une courbe des accroissements moyens annuels cumulés en fonction de l'âge cambial des pins d'Alep de l'Aurès oriental. L'observation de la tendance générale d'évolution de la croissance du diamètre moyen des individus du peuplement étudié montre quatre 4 phases d'évolution ;

- Une phase d'évolution progressive plus ou moins homogène, rapide et importante observée durant l'âge juvénile du peuplement plus particulièrement durant les premières 50 années de croissance.
- Une phase d'évolution progressive plus ou moins ralentie observée entre 55 et 80 ans
- Une phase de tendance à la stabilité (ralentissement absolu) de la croissance à partir de 88 ans.
- Ces trois phases sont raccordées par deux épisodes de chute brusque puis de relance subite de la croissance durant la période d'âge 51-55 ans ainsi qu'entre 81 et 88 ans.

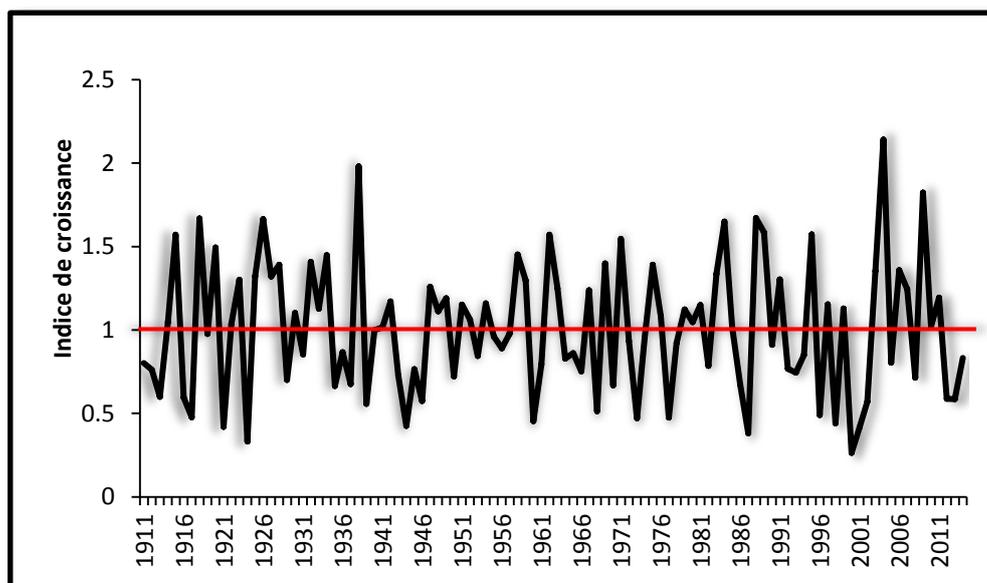


Figure 34. Chronologie résiduelle du pin d'Alep de la région de l'Aurès oriental.

La figure 34 correspond à la courbe de la chronologie résiduelle tracée à partir des indices de croissance résultant de la transformation des données des épaisseurs de cernes. Cette chronologie étant plus stable et plus adéquate à l'étude des relations croissance-climat par le fait de l'exclusion de l'intervention des différents facteurs non liés au climat dans la formation des cernes de croissance.

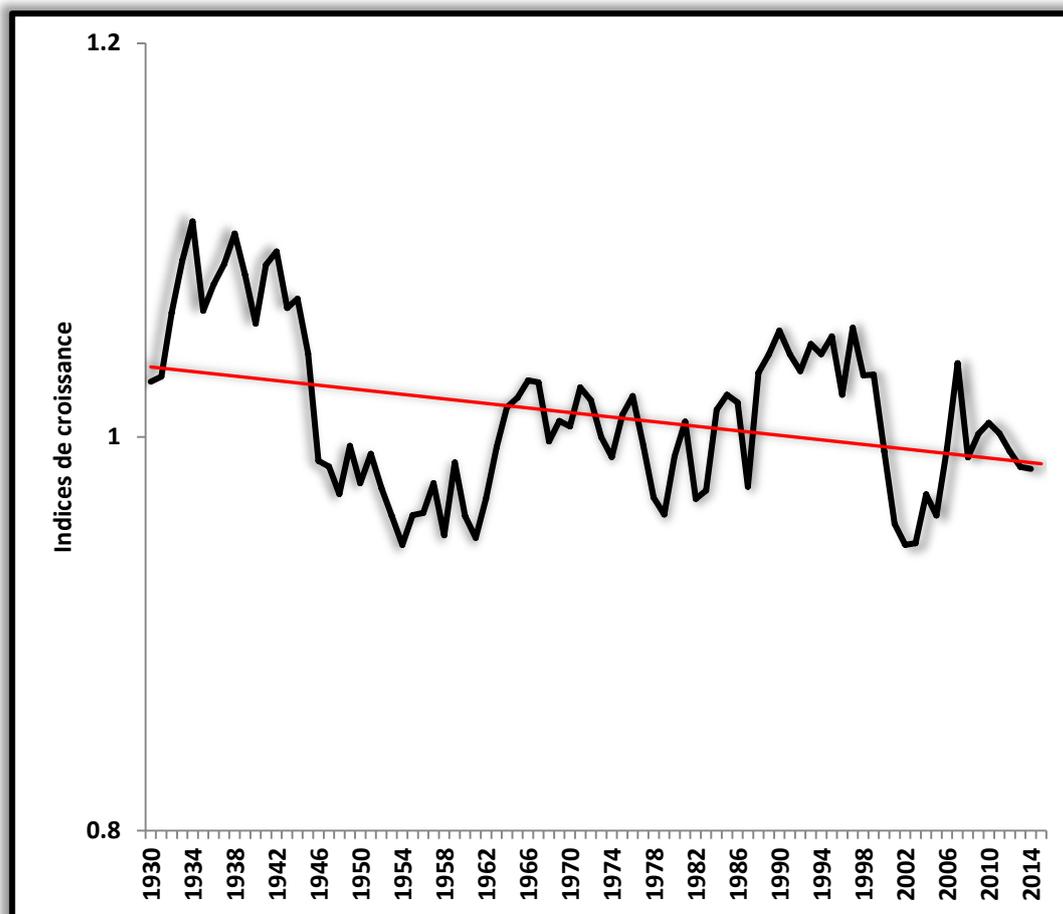


Figure 35. Moyenne mobile des indices de croissance de 20 ans décalés d'une année.

La figure 35 représentant la moyenne mobile des indices de croissance de 20 ans décalés d'une année a été tracée pour analyser l'évolution temporelle de la croissance radiale du pin d'Alep de la région des Aurès. Il ressort ainsi que la croissance montre une tendance à la diminution.

3.4. Influence des changements climatiques récents sur le pin d'Alep de l'Aurès oriental

3.4.1. Relation croissance/climat

La superposition de la courbe des précipitations annuelles et la chronologie résiduelle (figure 36) montre une concordance modérée qui ne semble pas permettre de déceler une relation étroite entre les cumuls annuels pluviométriques et la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude.

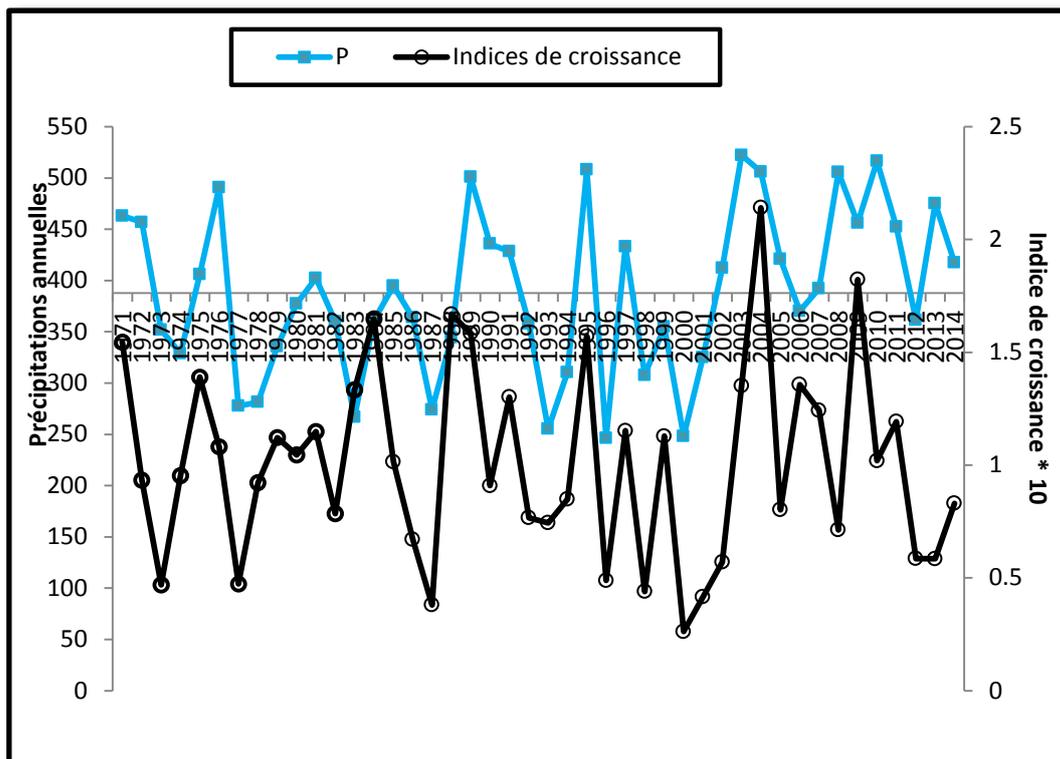


Figure 36. Relation indice de croissance – précipitations annuelles.

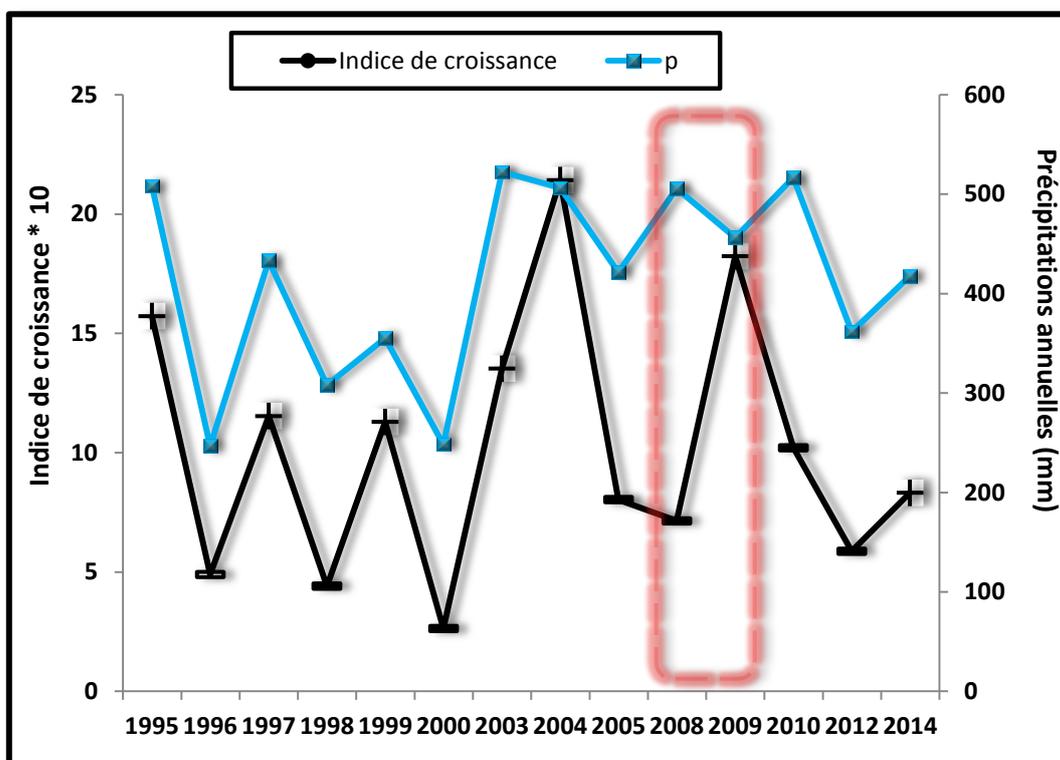


Figure 37. Relation années caractéristiques – précipitations annuelles.

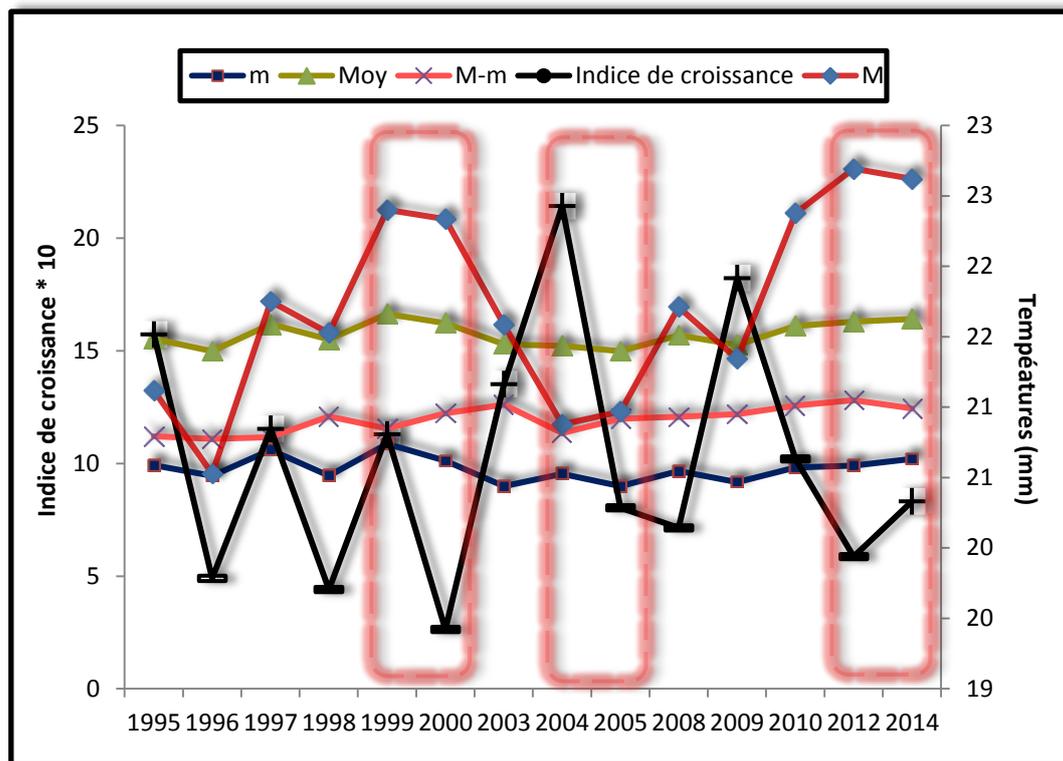


Figure 38. Relation années caractéristiques – températures.

Tableau 20. Bilan des variables climatiques corrélées aux indices de croissance du pin d'Alep de l'Aurès oriental.

Variables de régression	Coefficient de détermination R ²	Equation de régression linéaire
x : Précipitations annuelles y : Indice de croissance	0,50	y = 0,004x - 0,6243
x : Températures maximales y : Indice de croissance	0,12	y = -0,2691 x + 6,8609
x : Températures minimales y : Indice de croissance	0,02	y = -0,1285 x + 2,2756
x : Températures moyennes y : Indice de croissance	0,08	y = -0,2712 x + 5,2871
x : Amplitude thermique y : Indice de croissance	0,08	y = -0,2673 x + 4,2149

L'examen de la figure 38 qui considère parallèlement les courbes des températures (moyennes, minimales, maximales et amplitudes thermiques) et la courbe des indices de croissance, ainsi que le tableau 20 des corrélations entre les différents paramètres climatiques et les indices de croissance montrent qu'il n'existe pas un effet direct des conditions climatiques thermiques régionales sur la croissance radiale du pin d'Alep étudié. La figure 38 montre par ailleurs que les cernes de croissance se comportent différemment dans des conditions thermiques pareilles (1999/2000, 2004/2005, 2012/2014). De ce fait, Nicault *et al.* (2001) ont signalé que les températures n'agissent pas directement sur la croissance, mais elles interviennent toujours en combinaison avec les précipitations, sur le démarrage de la croissance et sur la mobilisation des réserves hydriques estivales.

De ce fait, et du fait de la courte durée d'enregistrement des variables thermiques dans la région d'étude, l'action des températures ne sera donc pas prise en compte dans la construction de la fonction de réponse.

3.5. Fonction de réponse

Tableau 21. Résultats de la fonction de réponse de la croissance du pin d'Alep aux précipitations (*Dendroclim*, 2002)

Année	Mois	Valeurs de corrélation
Année précédente (t-1)	Octobre	0
	Novembre	0
	Décembre	0
Année en cours (t)	Janvier	0
	Février	0,28
	Mars	0
	Avril	0,28
	Mai	0,29
	Juin	0
	Juillet	0,27
	Août	0
	Septembre	0

La réponse de la croissance du pin d'Alep de l'Aurès oriental au climat régional est quantifiée au moyen des valeurs de corrélation *Bootstap* résultante du programme *Dendroclim 2002*, entre la série des indices de croissance du pin d'Alep et des précipitations totales de douze (12) mois allant d'Octobre de l'année (t-1) au Septembre de l'année (t) tout au long de la période (1972/2013).

Les résultats de la fonction de réponse de la croissance radiale aux variables climatiques mensuelles présentées par les précipitations régionales sont exposés dans le tableau 21 et montrent que la corrélation est significative pour les mois de (Février, Avril, Mai et Juillet) qui ont un effet positif sur le cerne de croissance du pin d'Alep de la région d'étude. De ce fait, le pin d'Alep étudié n'est influencé que par le cumul pluviométrique de l'année en cours (t).

La confrontation de résultat obtenu à partir de la fonction de réponse du pin d'Alep de l'Aurès oriental avec les aboutissements des autres études de la littérature scientifique nous a conduits à formuler les interprétations suivantes ;

- La corrélation positive enregistrée pour le mois de **Février** ; qui coïncide avec l'époque de démarrage précoce de la croissance chez le pin d'Alep selon Nicault *et al.* (2001), exprime l'effet positif des précipitations tombées lors de ce mois sur la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude. Serre-Bachet (1992) a affirmé que les quantités de pluies tombées entre mi-février et début avril interviennent pour leur part sur l'accélération de l'activité cambiale.
- De leur part Papadopoulos *et al.* (2001) ainsi que Nicault *et al.* (2001) ont montré que les épaisseurs des cernes de croissance de pin d'Alep ainsi que son comportement estival sont déterminées par la répartition des précipitations durant la période de végétation, et plus particulièrement l'importance des précipitations en **Avril – Mai**. Ceci coïncide parfaitement avec nos résultats.
- L'effet positif des précipitations du mois de **Juillet** sur la croissance du pin d'Alep est justifié par le fait que cette période coïncide avec la reprise de l'activité cambiale du pin d'Alep. Toutefois, Serre-Bachet (1992) a signalé que la majeure partie du cerne étant mise en place dès la fin du mois de juin, toutes les données climatiques ultérieures n'ont guère d'importance explicative quant à l'épaisseur totale de ce cerne.

Généralement, ce sont les conditions climatiques qui précèdent la mise en place des cernes de croissance, et notamment des périodes de réactivation cambiale et d'activité cambiale qui définissent la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude.

Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter les pinèdes situées dans l'Aurès oriental ainsi que de caractériser leur réponse au climat régional, à travers l'utilisation des concepts et des techniques de base d'extraction et d'analyse des données dendrométriques et dendrochronologiques.

L'étude a permis de mettre en évidence un fait concernant l'arbre et le climat d'une part, et l'arbre et la concurrence vitale d'autre part.

L'analyse dendroécologique et le modèle de corrélation font ressortir une tendance explicite pour la relation accroissement-climat.

Les résultats montrent ainsi que la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude est aussi bien positivement corrélée au nombre d'arbres à l'hectare, qu'aux précipitations qui coïncident avec l'activité et la réactivation cambiale de l'année en cours de croissance, plus particulièrement celles des mois de *Février*, d'*Avril*, de *Mai* et de *Juillet*.

Le climat à travers les précipitations, joue donc un rôle majeur dans le processus de mise en place du cerne, et dans les rythmes de la croissance radiale du pin d'Alep de la région d'étude, du fait que les précipitations interviennent au niveau de la disponibilité en ressources hydriques principalement en printemps qu'au mi-été.

L'étude des années caractéristiques a également révélé que dernièrement le pin d'Alep échantillonné présente une tendance à la régression de la croissance radiale.

La forte variabilité spatiale des paramètres dendrométriques qui caractérisent le pin d'Alep composant la pinède aurasienne montre que les conditions environnementales exercent quant à elles une influence sur la réponse du pin d'Alep aux changements climatiques récents, en déterminant ainsi sa plasticité écologique.

Les particularités dendrométriques du pin d'Alep échantillonné témoignent le rôle écologique et économique que joue la pinède aurasienne à l'échelle nationale.

Les approches utilisées se sont avérées très utiles dans la compréhension de la réaction du pin d'Alep aux conditions biotiques (concurrence vitale) et abiotiques (variables climatiques) de milieu. Toutefois, la compréhension de l'impact des changements climatiques récents sur les peuplements de pin d'Alep et sur leur dynamique et structure ne peut se limiter uniquement à la dendrochronologie.

C'est dans cet ordre d'idée que les chapitres qui se suivent utilisent d'autres éléments qui peuvent compléter l'analyse conduite dans ce chapitre, plus précisément la caractérisation de la dynamique spatiotemporelle du pin d'Alep de l'Aurès oriental ainsi que de la modélisation de leur répartition spatiale potentielle.

L'établissement des projections futures, par rapport au comportement susceptible des arbres à moyen et à long terme n'est possible que si l'on maîtrise suffisamment bien le présent, aussi bien que le passé, ainsi une base de données relative à l'histoire climatique de la zone d'étude devrait être disponible, pour indiquer avec précision et sur une longue durée les périodes favorables et défavorables à la croissance.

Au terme de ce chapitre, il convient de signaler que la présente étude a été limitée par l'absence d'un bon quadrillage des stations météorologiques sur la région d'étude et les séries de données météorologiques qui sont souvent courtes et/ou lacunaires, par le manque d'un matériel adéquat de dendrochronologie, ainsi que par l'inaccessibilité de certains sites de la région d'étude.

CHARITRE IV

Evolution spatiotemporelle des
écosystèmes forestiers à pin d'Alep
de l'Aurès oriental

Introduction

Dans un récent rapport de la FAO (2013), la quasi-totalité des pays méditerranéens montre un accroissement continu des surfaces forestières estimées à 0,68 % par an. L'Algérie présente exceptionnellement des épisodes de diminution de la couverture végétale, à l'encontre des grands efforts réservés par l'état en matière de protection et d'extension des étendues boisées.

Une évolution régressive est observée dans certains écosystèmes forestiers, on note par exemple les dépérissements des cédraies du Belezma et de l'Aurès qui connaissent un déclin majeur de leurs superficies d'origine ou encore les incendies récurrents des pinèdes qui ont ravagé 35 025 hectares de surface totale boisée par an en Algérie durant la période 1985-2010 (Meddour-Sahar et Derridj, 2012).

Cette dynamique liée probablement en premier lieu aux modifications climatiques est aussi accentuée par les actions anthropiques néfastes et répétées telles que le défrichement, l'excès de pâturage, l'écimage des arbres, elle a entraîné un déplacement des aires bioclimatiques des espèces (Venetier *et al.*, 2005) et une variation de la structure et de la compositions des écosystèmes.

Pour mieux appréhender cette dynamique, la télédétection compte parmi les outils incontournables, qui présentent un avantage particulier grâce à ses caractéristiques d'observation globale, d'enregistrement, et d'analyse.

La mise en œuvre des images satellitaires multitudes, récentes et historiques, acquises par les satellites d'observation de la terre « Landsat » constitue un moyen d'étude privilégiée pour la détection des changements dans le temps et dans l'espace. Plusieurs méthodes ont été inventées et appliquées (Mas, 2000).

Dans cette optique, nous avons jugé utile de mener une étude sur la dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol au niveau des pinèdes naturelles les plus importantes dans les Aurès, au cours des 27 dernières années. Cette dynamique est analysée à travers des données diachroniques de 1987 et 2014.

Zone d'étude

La zone d'étude est localisée au niveau de l'Aurès oriental, partie intégrante de l'Atlas Saharien qui se situe géographiquement au nord-est de l'Algérie (figure 39). Cette zone est composée par deux massifs contigus. Les Beni Imloul avec plus de 75 000 hectares (ONTF, 1977) et le massif de Ouled Yagoub qui compte 45 000 hectares (BNEDER, 2010) et qui prolonge les Beni Imloul dans sa partie nord-est.

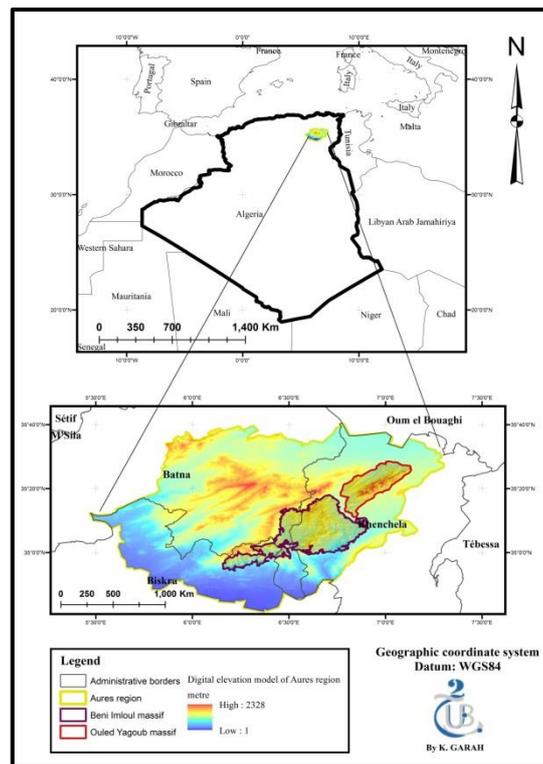


Figure 39. Carte de situation de la zone d'étude.

La zone d'étude se caractérise par une grande variabilité tant climatique que topographique. Les paramètres climatiques changent selon l'altitude, l'exposition et la pente. L'altitude maximale est de 1749 m à Beni Imloul alors qu'elle culmine à 2160 m à Ouled Yagoub (figure 40).

Des dénivelés importants et de fortes pentes sont à l'origine de la configuration et de la nature orographique du terrain. En effet, plus de 30 % des terrains constituant les deux massifs étudiés s'installent sur de fortes pentes, comprises entre 15 et 30 % (tableau 22).

Du fait du relief très contrasté et accidenté, des étages bioclimatiques variant du semi-aride jusqu'à subhumide peuvent y exister. Les précipitations moyennes annuelles oscillent entre 126 et 620 mm. La température moyenne annuelle varie de 11,9 à 18,35 °C. Le massif des Beni Imloul étant moins arrosé avec des températures plus élevées que celles de Ouled Yagoub.

CHAPITRE IV : Evolution spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental

Les espèces prédominantes sont le cèdre de l'Atlas sur les versants nord et en hautes altitudes, le pin d'Alep en moyennes altitudes et le chêne vert (figure 43 et 46). La végétation étant beaucoup plus hétérogène, et plus diversifiée à Ouled Yagoub, qu'à Beni Imloul.

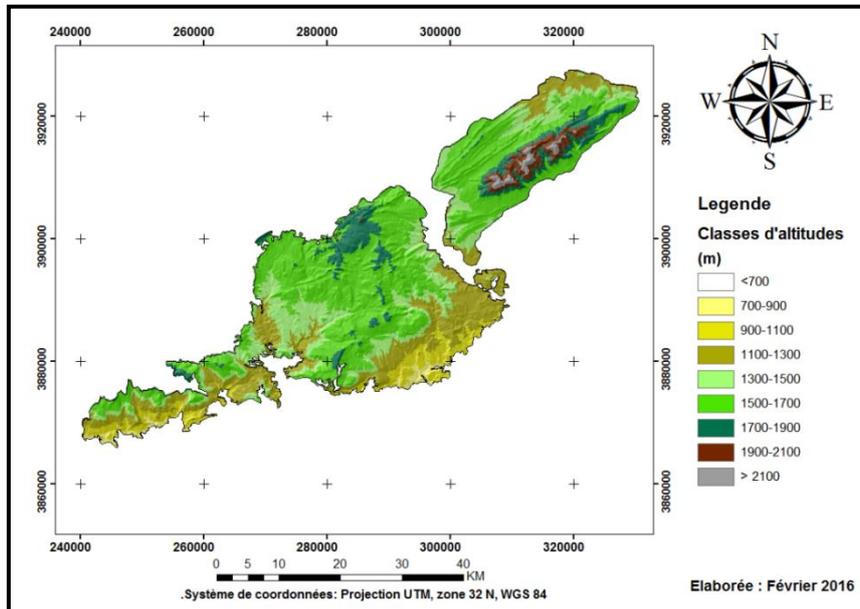


Figure 40. Carte des altitudes de la zone d'étude.

Tableau 22. Classes des pentes de la zone d'étude

Classes des pentes (%)	Intitulé de la classe	Superficie (%)	
		Ouled Yagoub	Beni Imloul
[0 – 0,5 [	Horizontal	0,05	0,07
[0,5 - 2 [	Subhorizontal	0,77	0,90
[2 - 5 [	Très faible	6,38	6,79
[5 - 10 [	Faible	18,44	21,67
[10 - 15 [	Modérée	16,68	22,97
[15 - 30 [	Forte	33,43	36,17
[30 - 45 [	Très forte	15,65	8,71
[45 - 70 [	Extrême	7,48	2,51
[70 – 100 [	Abrupte	1,10	0,21
> 100	Très abrupte	0,02	0,01
TOTAL		100	100

Matériel et méthodes

L'occupation du sol au niveau des deux pinèdes a été étudiée à partir des images satellitaires Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI, avec une résolution spatiale de 30 m. Ces images ont servi à l'étude diachronique des deux massifs forestiers. Le principe de cette méthode est basé sur la classification des deux scènes acquises à des dates différentes. Il est à noter que la méthodologie choisie a été déjà adoptée dans la région des Aurès par Benmassaoud *et al.* (2009), Beghami *et al.* (2012), Bouzekri et Benmassaoud (2014), et Chafai (2016), qui ont travaillé sur des combinaisons de classes d'occupation du sol différentes les unes aux autres. La figure 3 résume les étapes du processus méthodologique.

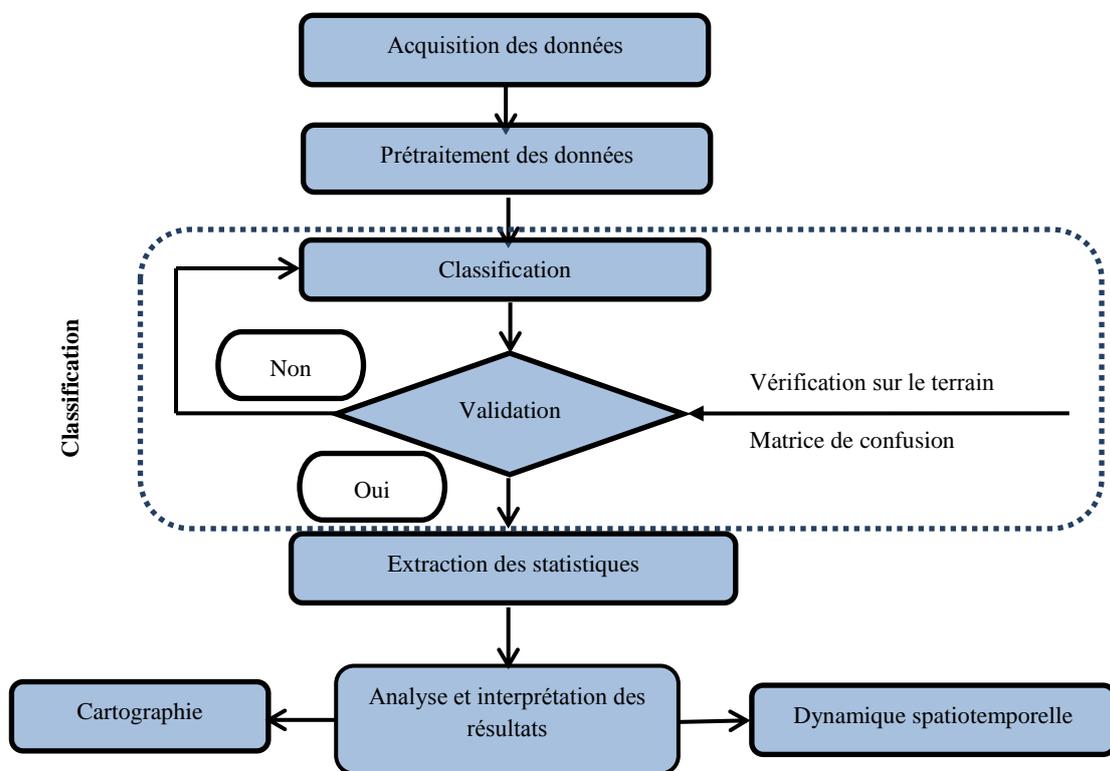


Figure 41. Organigramme de la démarche méthodologique

L'acquisition des données consiste à télécharger des images satellitaires Landsat libres de droits, orthorectifiés, multiscènes et multidates (tableau 23), à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> ou <http://earthexplorer.usgs.gov/>

Tableau 23. Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Capteur	Date d'acquisition	Temps d'acquisition	Path/Row
Landsat-5	03-08-1987	9 h 33 min 1 s	193/035
TM	03-08-1987	9 h 33 min 25 s	193/036
Landsat-8	13-08-2014	10h 07 min 23 s	193/035
OLI	13-08-2014	10h 07 min 47 s	193/036

Entre deux images, plusieurs facteurs, entre autres ; la position solaire, position de la cible dans l'image, les facteurs topographiques, les facteurs atmosphériques et les effets temporels dus à l'évolution des caractéristiques de la cible, sont susceptible d'entraîner des modifications de mesure au niveau des capteurs, et une variabilité des réponses spectrales pour un même type de peuplement, par conséquent.

Ainsi, le choix des images satellitaires y compris leur date et leur temps d'acquisition, est un élément clé dans le processus de comparaison.

Quant aux facteurs ; état de la végétation et conditions d'observation, nous nous sommes placés dans des conditions aussi comparables que possible.

Le prétraitement des données, se résume dans la délimitation et le découpage de la zone d'étude après le mosaïquage des scènes, ainsi que dans la correction atmosphérique des images (celle-là a été réalisée avec le module *Flaash* du logiciel ENVI).

Une classification dirigée ou supervisée de l'occupation du sol a été utilisée. Par conséquent, les classes ont été déterminées sur la base des caractéristiques spectrales des objets géographiques, et validées par les informations récoltées sur le terrain. Ces informations se résument essentiellement dans la description des formations végétales, et la prise de leurs coordonnées géographiques par GPS (*global positioning system*), ainsi que les photos géoréférencées prises au cours des différentes sorties de prospection.

En se servant du programme *Google earth*, des points d'échantillonnage complémentaires ont été pris et la réalité terrain a été examinée pour les endroits à accès difficile.

Résultats et discussion

La composition et la structure spatiale de la zone d'étude sont présentées par les cartes (figure 42 et 43). En effet, deux cartes de dates différentes (1987 et 2014) ont été élaborées pour chaque massif forestier.

Les résultats de synthèse sont rapportés en chiffres (tableau 23 et 24). Nous avons calculé les taux de changement entre les surfaces des classes d'occupation du sol entre 1987 et 2014.

La précision de la classification a été évaluée par le biais de la matrice de confusion. Les précisions globales obtenues sont respectivement pour l'image 1987 et 2014 ; de 98 % et 95 % (coefficient Kappa de 0,98 et 0,93) pour le massif des Beni Imloul, et de 81 % et 80 % (coefficient Kappa de 0,76 et 0,72) pour le massif de Ouled Yagoub.

1. Massif des Beni Imloul

La classification supervisée des images satellites, du massif des Beni Imloul (figure 42 et 43), a permis de calculer les superficies de chaque classe d'occupation du sol et d'évaluer la dynamique spatiotemporelle dans cette pinède (tableau 24).

Tableau 24. Dynamique spatiotemporelle du massif des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

Massif des Beni Imloul	1987		2014		Dynamique		
	Superficie						
Classes	ha	%	ha	%	ha	%	%
Pin d'Alep	53075	47,90	35718	32,23	- 17357	- 15,66	- 32,60
Chêne vert	36019	32,50	30320	27,36	- 5699	- 5,14	- 15,82
Végétation herbacée	3275	2,96	21658	19,54	+ 18383	+ 16,59	+ 561,31
Arboriculture	25	0,02	104	0,09	+79	+ 0,07	+ 316
Sol nu	10836	9,78	12640	11,41	+1804	+ 1,63	+ 16,65
Affleurement rocheux	7582	6,84	10373	9,36	+2790	+ 2,52	+ 36,80

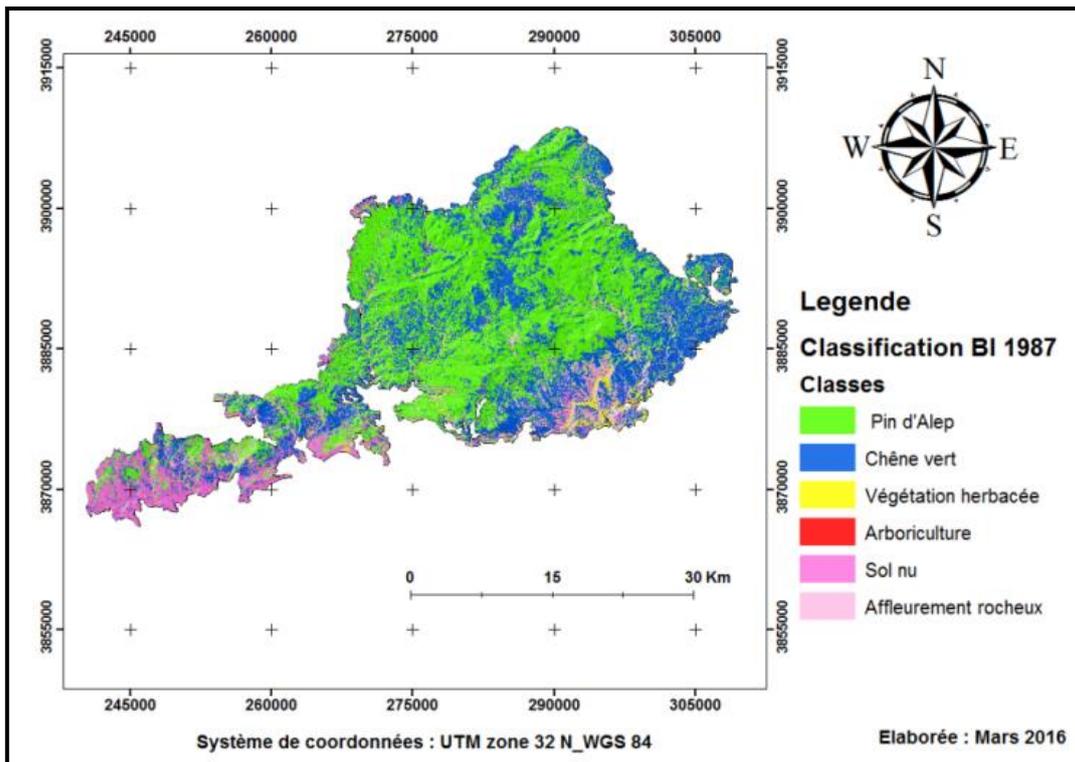


Figure 42. Carte d'occupation du sol du massif des Beni Imloul en 1987.

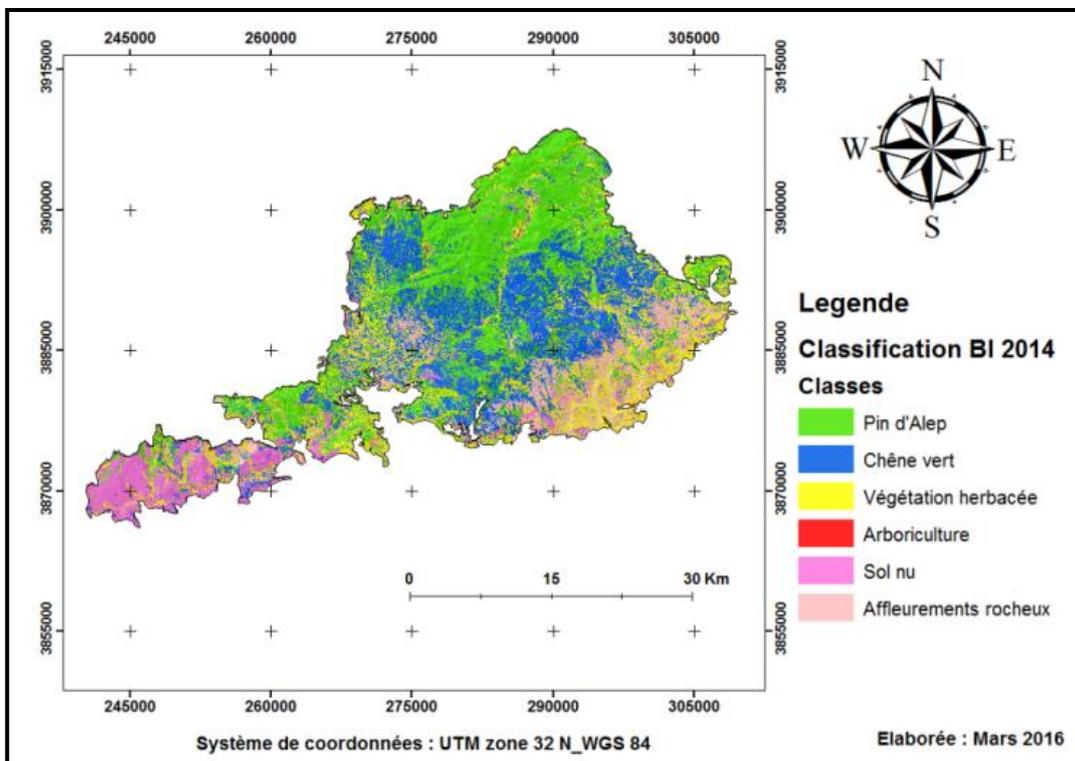


Figure 43. Carte d'occupation du sol du massif de Beni Imloul en 2014.

L'analyse diachronique montre entre 1987 et 2014, une forte régression des formations de pin d'Alep, estimée à 33 % de sa surface initiale et à 16 % de la superficie totale : cette régression affecte surtout la partie sud à sud-ouest du massif, tandis que la partie nord est caractérisée par une progression apparente du pin d'Alep sur des surfaces occupées autrefois par le chêne vert et d'autres formations. Cette transformation est liée très probablement à l'efficacité des actions sylvicoles surtout les coupes de régénération pratiquées dans les années 1980. Ces coupes réalisées sur de petites surfaces ont permis de dégager l'étage dominant et de desserrer progressivement le peuplement jusqu'à l'installation de la régénération, qui était quasiment nulle à cette époque (Abdessemed, 1984).

Les pertes d'énormes surfaces de pin d'Alep et, dans une moindre mesure, de chêne vert (16 % de sa surface initiale et 5 % de surface totale du massif) seraient essentiellement dues aux incendies qui constituent le facteur de dégradation le plus redoutable de la forêt. D'ailleurs, les premières conclusions de la rencontre ASAL (agence spatiale algérienne) et DGF (direction générale des forêts) sur la présentation du bilan préliminaire des feux de forêt 2012 montrent que la région d'étude a été classée comme la plus affectée par les incendies à l'échelle nationale. La figure 44 montre en effet que le massif des Beni Imloul a subi un très grand incendie durant l'été 2012 qui a ravagé plus de 6000 ha.

Les zones touchées par le feu durant cette période sont en parfaite concordance avec les parties affectées par la régression dans la carte d'occupation du sol élaborée pour l'année 2014 (figure 43).

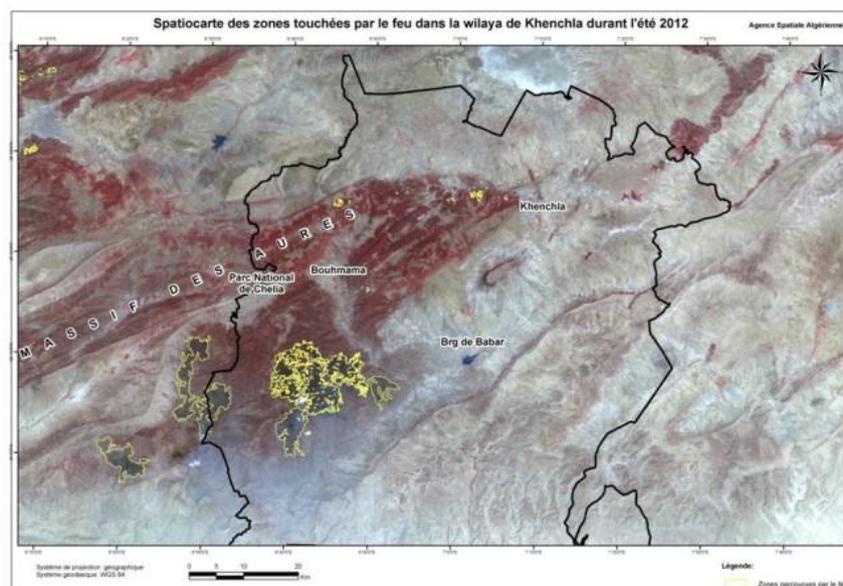


Figure 44. Carte des zones touchées par le feu dans la wilaya de Khenchela durant l'été 2012 (ASAL, 2013).

La régression enregistrée pour le pin d'Alep et pour le chêne vert, se fait au profit de la classe de végétation herbacée (17 %) suivie par les affleurements rocheux (3 %), sol nu (2 %), et finalement l'arboriculture (0,07 %).

Bien que la progression enregistrée dans la classe « végétation herbacée » soit extrêmement forte (561 % de sa surface initiale), elle ne reflète pas une régression réelle de la forêt du fait qu'elle comporterait également une jeune régénération du pin d'Alep et des rejets de souches de chêne vert, après les incendies. Cette forme de régénération est confuse et non quantifiable sur images satellitaires Landsat, en raison de la résolution spatiale modérée de ces dernières.

La dénudation du sol serait due aux défrichements exercés par la population riveraine au profit de la céréaliculture ; cette dernière activité est imperceptible sur les images sur lesquelles nous avons travaillé, en raison de leur date d'acquisition qui coïncide avec la fin de la saison estivale, où tous les champs ont été moissonnés.

Les défrichements sont également exercés par la création de vergers d'arbres fruitiers qui se sont multipliés ces dernières années à la limite de la forêt, avec évolution de plus de 300 % de leur surface initiale. Toutefois, ce taux ne reflète pas la surface occupée réellement, car les vergers d'une surface inférieure à 900 m² ne sont pas pris en compte.

La progression dans la classe des affleurements rocheux s'expliquerait par l'érosion importante des sols nus non protégés par le couvert végétal (Berkane et Yahiaou, 2007), mais aussi par une confusion entre les roches et les constructions, qui ont évolué dans le massif au détriment de la forêt.

2. Massif de Ouled Yagoub

Les superficies des différentes classes d'occupation du sol, dans le massif de Ouled Yagoub, issues de la classification supervisée des images satellites couvrant cette zone (figure 45 et 46), ont permis d'évaluer la dynamique spatiotemporelle entre 1987 et 2014 (tableau 25).

Tableau 25. Dynamique spatiotemporelle du massif de Ouled Yagoub entre 1987 et 2014

Massif de Ouled Yagoub	1987		2014		Dynamique		
	Superficie						
Classes	ha	%	ha	%	ha	%	%
Pin d'Alep	21538	47,05	15499	33,86	-6039	-13,19	- 28,04
Cèdre de l'Atlas	3350	7,32	1844	4,03	-1506	-3,29	- 44,96
Chêne vert	7723	16,87	9793	21,39	+ 2069	+ 4,52	+ 26,79
Frêne dimorphe	2488	5,43	3379	7,38	+ 891	+ 1,95	+ 35,81
Zone incendiée	0	0,00	426	0,93	+ 426	+ 0,93	+ 100
Végétation herbacée	1377	3,01	4163	9,09	+ 2787	+ 6,09	+ 202,40
Arboriculture	62	0,14	72	0,16	+ 9	+ 0,02	+ 14,52
Sol nu	9239	20,18	10603	23,16	+ 1363	+ 2,98	+ 14,75

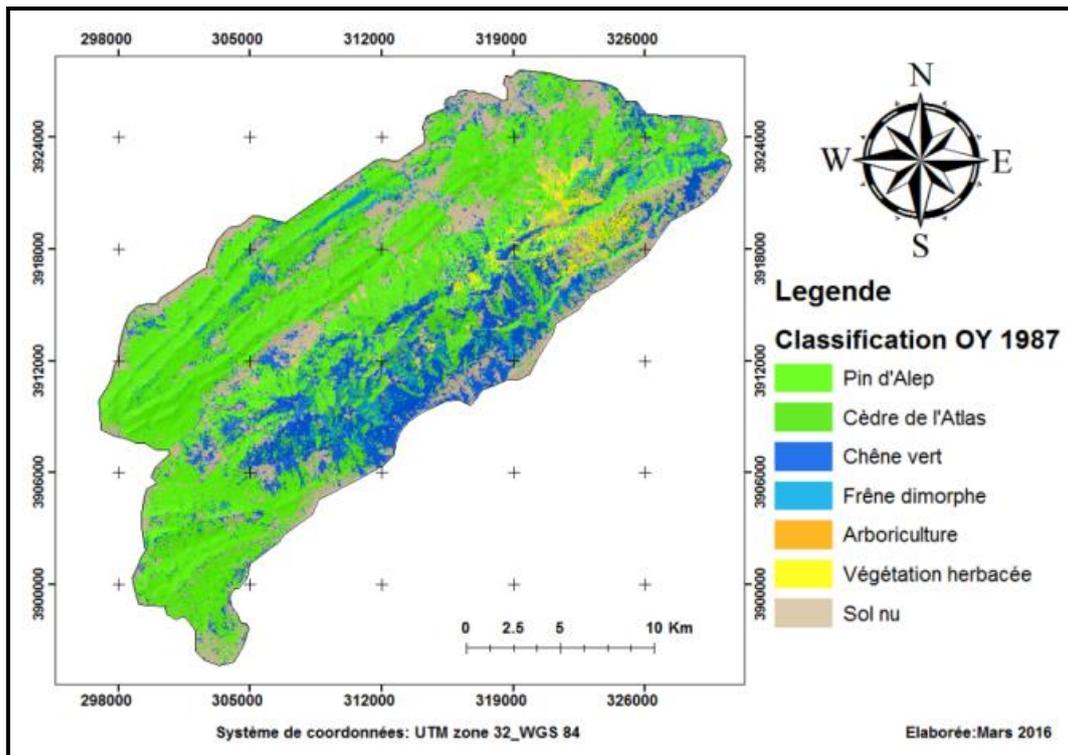


Figure 45. Carte d'occupation du sol du massif de Ouled Yagoub en 1987.

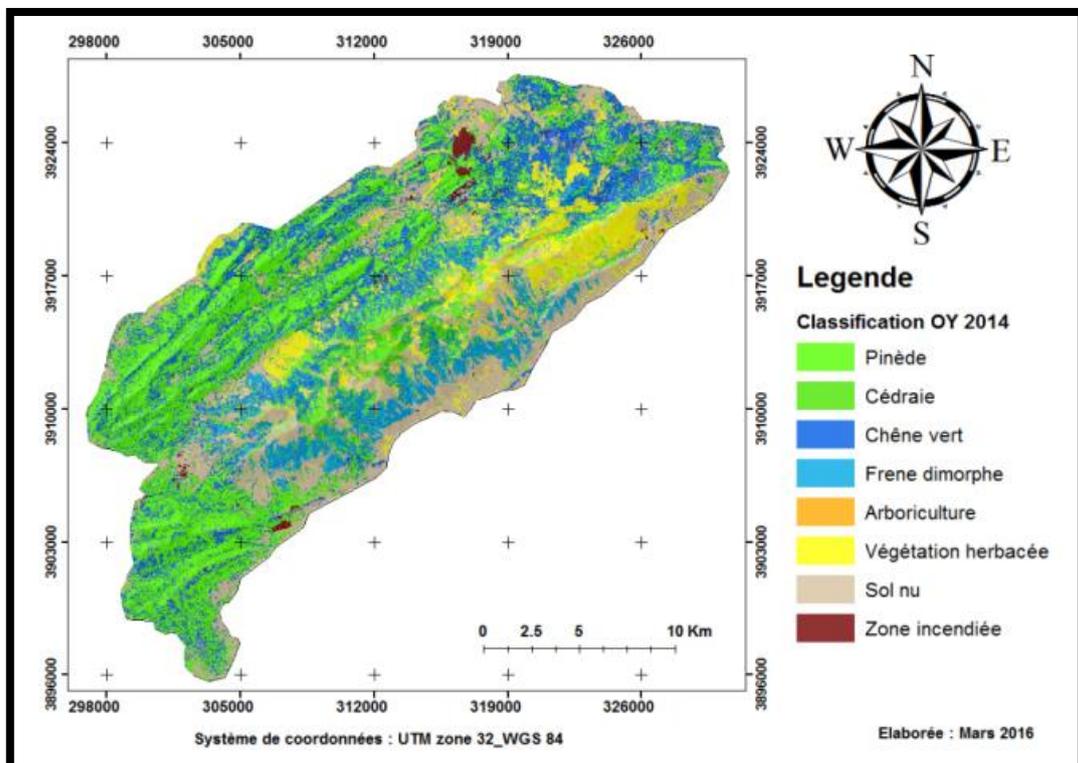


Figure 46. Carte d'occupation du sol du massif de Ouled Yagoub en 2014.

Pareillement, aux pinèdes du massif des Beni Imloul, la superficie occupée par le pin d'Alep dans le massif de Ouled Yagoub s'est réduite en 27 ans. Cette régression estimée à 6039 ha soit 28 % de sa surface initiale et 13 % de la surface totale du massif serait essentiellement due aux incendies récurrents qui ont récemment touché la pinède. Le dernier incendie avant l'acquisition de l'image en 2014 a entraîné à lui seul la perte de 3 % de la surface occupée principalement par le pin d'Alep.

Il est à noter que la superficie occupée par le pin d'Alep en 1987 est entachée d'une légère sous-estimation, qui est due à la confusion inévitable entre le pin et le cèdre, où les réflectances des deux espèces dans l'image satellitaire 1987 sont très proches. Cela a entraîné l'apparition de quelques pixels correspondant au cèdre en plines zones occupées par le pin d'Alep.

Quant au cèdre de l'Atlas, il occupe 3350 ha. Cette superficie est très proche des chiffres rapportés par le BNEF (1984 ; *in* Bentouati, 2008) et le BNEDER (2010), qui ont attribué respectivement 3327 ha et 3415 ha au cèdre dans le massif de Ouled Yagoub. Une diminution de 1506 ha soit 45 % de sa surface initiale et 3 % de la surface totale du massif a été également enregistrée pour le cèdre de l'Atlas. Les exigences de l'espèce ne lui permettent pas de coloniser les basses et moyennes altitudes situées sur versant sud.

La régression du cèdre de l'Atlas avait déjà commencé au début de la période étudiée avec une réduction de 400 ha par an dans la région des Aurès (Abdessemed, 1984), et est confirmée par le BNEDER (2010), qui a signalé que les peuplements sains du cèdre de l'Atlas n'occupent que 1713 ha à Ouled Yagoub.

Cette régression ancienne et continue s'est aggravée avec le dépérissement qui a affecté le cèdre de l'Atlas dans la zone d'étude, à l'instar de toutes les cédraies dans la région des Aurès, depuis 1982 (Bentouati, 2008). Le dépérissement du cèdre à Ouled Yagoub était jugé autrefois le moins inquiétant dans la région des Aurès (Abdessemed, 1984), du fait de la situation géographique de la cédraie à l'abri des influences sahariennes, a passé de quelques arbres isolés à des bouquets entiers, de surfaces variables. (Bentouati et Bariteau, 2005 ; Bentouati, 2008).

Dans quelques stations de la zone étudiée, le frêne dimorphe, une espèce de moindre importance commence à prendre de l'ampleur aux dépens de l'espèce dominante. Elle a

enregistré un accroissement de 2 % de la classe occupée par l'espèce, ce qui représente un gain de 36 % de sa surface initiale.

Cette progression spectaculaire du frêne dimorphe dans le massif de Ouled Yagoub a été déjà mise en évidence par deux études récentes (Chafai, 2016 ; Beghami *et al.*, 2012) sur l'occupation du sol dans le massif de Ouled Yagoub et celui de Beni Oudjana.

Le taux de progression le plus élevée est de 6 % (200 % de la surface initiale), correspond à la classe de végétation herbacée, suivi par la classe de chêne vert (5 %) (+27 %), et du sol nu (3 %) (+14 %).

Quant au chêne vert, l'observation et la comparaison visuelle des cartes d'occupation du sol du massif de Ouled Yagoub montrent que l'expansion de cette espèce était surtout au profit du pin d'Alep.

La classe d'arboriculture occupe environ 0,02 % (+15 % de sa surface initiale). Les activités agricoles dans la zone d'étude sont généralement établies sur de petites parcelles installées en plein maquis ou même en forêt défrichée. La superficie dépasse rarement les 900 m².

3. Récapitulatif

À travers les résultats obtenus pour les deux massifs étudiés, nous constatons que le patrimoine forestier de la région d'étude a subi un grave recul des superficies boisées. Nos résultats coïncident avec ceux de Benmassaoud *et al.* (2009), ainsi que Bouzekri et Benmassaoud (2014) qui ont travaillé respectivement sur la partie sud-ouest des Aurès et Aurès oriental, en adoptant d'autres combinaisons d'unités d'occupation du sol.

Bien que les causes de dégradation traditionnelles sont multiples (Abdessemed, 1984, 1985 ; Bentouati et Bariteau, 2005 ; Bentouati, 2008), les feux de forêt récurrents pour la pinède et le dépérissement pour la cédraie constitueraient les causes principales de la dégradation actuelle des massifs étudiés.

Ces causes de dégradation qui étaient classées auparavant rares et non inquiétantes dans les massifs étudiés (Abdessemed, 1984) seraient amplifiées par les probables changements climatiques. Ces derniers devraient avoir des effets majeurs dans la région méditerranéenne (Quezel et Médail, 2003).

D'ailleurs, Rigolot (2008) a mis l'accent sur la progression conjointe entre les feux de forêt dans leur nombre et intensité, et les changements climatiques.

D'autre part, en considérant la forêt, un milieu très réactif au climat, Vennetier (2012), a signalé que les changements climatiques pourraient engendrer des dépérissements massifs de forêts en limites basses et sud des aires de répartition des espèces, le renouvellement naturel n'ayant pas le temps de se produire.

Les deux causes suscitées sont favorisées par la vulnérabilité de la végétation de la région d'étude, par le fait de sa localisation géographique et à l'exposition aux influences sahariennes, qui ont amplifié les conditions climatiques et ont accentué la période de sécheresse estivale devenue plus longue.

Dans ce contexte, et dans le cadre des effets des changements climatiques dans les pays du sud de la méditerranée, Quezel et Médail (2003) ont affirmé que les structures préforestières et présteppiques surtout à conifères, entre autres le pin d'Alep, situées dans les lisières sahariennes, sont sujettes d'une destruction progressive, rapide et inéluctable.

D'autre part, la prédominance des essences résineuses facilement inflammables (pin d'Alep) (Alexandrian et Rigolot, 1992), sur des reliefs très accidentés et à forte pente, favorise la propagation des incendies et gêne le dispositif d'intervention.

Conclusion

En guise de conclusion, la présente étude a permis, grâce à la méthode de comparaison des classifications, la détection et la quantification d'un recul dans le patrimoine forestier Aurasién. Une dégradation qui serait due aux aléas naturels liés essentiellement à la position géographique et bioclimatique de la zone. À cela s'ajoutent les actions anthropiques (défrichements, et coupes illicites à but agricole ou de construction, etc.). Enfin les changements climatiques que connaît la région méditerranéenne seraient aussi responsables de la situation actuelle de ces écosystèmes forestiers si fragiles de l'étage semi-aride.

Les résultats obtenus témoignent ainsi de l'utilité d'une approche simple et efficace dans l'étude de la dynamique spatiotemporelle des massifs forestiers.

CHARITRE V

Caractérisation spectrale des
écosystèmes forestiers à pin d'Alep
de l'Aurès oriental et leur
dynamique

Introduction

Les écosystèmes forestiers de la région des Aurès constituent un milieu très fragile à la dégradation.

La télédétection satellitaire est une approche efficace à l'évaluation de cette dégradation à l'échelle du paysage (à des échelles larges), par le fait qu'elle offre la possibilité d'avoir des informations opportunes décrivant la structure spatiale des écosystèmes forestiers, et son évolution au fil de temps.

Plus particulièrement, l'extraction de certaines propriétés de végétation à partir des images satellitaires est un élément clé permettant de détecter ainsi qu'à quantifier l'évolution dans le temps et dans l'espace de ces ressources naturelles.

De ce fait, un grand nombre d'indices spectraux ont été conçus et développés pour estimer les paramètres biophysiques de la végétation verte, par le fait que celle-ci possède une signature spectrale distincte et spéciale. En condition favorable, la chlorophylle présente dans la végétation verte (vivante et photosynthétiquement active) un maximum d'absorption de la portion rouge (R) du spectre électromagnétique du domaine solaire, et un maximum de réflectance dans le domaine du proche infrarouge (PIR) (McVicar et Bierwirth, 2001). Par conséquent les spécialistes de la végétation s'intéressent essentiellement à ces deux bandes spectrales dont sont équipés les principaux capteurs satellitaires.

Bien que différentes combinaisons des bandes spectrales ont été utilisées afin de développer des indices de végétation, la différence de réflectance entre le domaine du rouge et d'infrarouge du spectre électromagnétique a été exploitée depuis plusieurs décennies afin de caractériser la végétation (Huete, 1988).

Bannari *et al.* (1995) ont mentionné que plus de 40 indices de végétation ont été développés pour différentes applications, uniquement dans les débuts des années 70 (les débuts de la télédétection satellitaire).

À l'heure actuelle, et suite au progrès considérable des recherches dans la télédétection satellitaire, des centaines d'indices spectraux sont formulés.

L'absence d'études portant sur la précision des indices applicables dans notre région d'étude, nous a menés à (tester) mettre en comparaison un certain nombre d'indices dans la mesure quantitative de la vigueur de la végétation (Campbell, 1987).

Dans ce contexte, la présente étude vient compléter l'analyse du chapitre précédent qui comporte une contribution à la caractérisation de la dynamique spatiotemporelle des

écosystèmes forestiers dans l'Aurès oriental, dans laquelle les forêts objet de l'étude ont montré un recul accru des étendues boisées.

Ce changement qualitatif et quantitatif dans le paysage aurasién, a été apporté essentiellement par les conditions climatiques sévères, les feux de forêt et l'action anthropique, et accentué par les probables changements climatiques.

Donc, cette étude étant nécessaire pour améliorer la compréhension du processus de dégradation des écosystèmes forestiers de l'Aurès oriental au cours des vingt dernières années, ainsi que de déterminer l'indice le plus adéquat à l'analyse de la couverture végétale aurasiénne.

Le présent chapitre constitue ainsi une contribution à l'évaluation quantitative, qualitative et évolutionnelle des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental par la méthode de calcul d'indices spectraux. Il traite au premier lieu le calcul d'indices bruts et leur inter-comparaison, puis l'évaluation diachronique établie pour chaque indice au deuxième lieu.

Matériel et méthodes

Les données utilisées dans cette étude sont des images satellitaires Landsat libres de droits, orthorectifiées, multiscènes et multidates avec une résolution spatiale de 30 m, acquises à partir du site <http://glovis.usgs.gov/> ou <http://earthexplorer.usgs.gov/> (Tableau 26), des données relatives aux caractéristiques topographiques extraites à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude (avec résolution spatiale de 30 m) (chapitre I), ainsi que des données provenant des conclusions de la classification supervisée procédée pour l'évaluation spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental en Algérie (chapitre IV).

Le choix des images satellitaires à exploiter dans la présente étude s'est effectué selon des critères de leur disponibilité, d'absence de couverture nuageuse au niveau de la zone d'étude, et de similarité interannuelle des conditions d'acquisition.

Les images satellitaires choisies (Tableau 26) ont recueilli un prétraitement ; qui se résume dans la correction atmosphérique avec le module *Flash* du logiciel ENVI et la délimitation et le découpage de la zone d'étude après mosaïquage des scènes.

Tableau 26. Caractéristiques des images satellitaires utilisées.

Capteur	Date d'acquisition	Temps d'acquisition	Path/Row
Landsat-8 OLI	13-08-2014	10 h 7 min 23 s	193/035
	13-08-2014	10 h 7 min 47 s	193/036
Landsat-5 TM	17-07-2010	9 h 57 min 49 s	193/035
	17-07-2010	9 h 58 min 13 s	193/036
Landsat-5 TM	14-07-2003	9 h 43 min 42 s	193/035
	31-08-2003	9 h 44 min 59 s	193/036
Landsat-7 ETM	13-07-2000	9 h 58 min 48 s	193/035
	13-07-2000	9 h 59 min 12 s	193/036
Landsat-5 TM	24-07-1995	9 h 11 min 45 s	193/035
	24-07-1995	9 h 12 min 9 s	193/036
Landsat-5 TM	03-08-1987	10 h 7 min 23 s	193/035
	03-08-1987	10 h 7 min 47 s	193/036

Le principe de la méthodologie adoptée, est basé sur le calcul de six (6) indices spectraux à partir de réflectances spectrales des images satellitaires acquises pour la zone d'étude à des dates différentes, et la mise en comparaison interannuelle des résultats de chaque indice, puis l'explication de la signification des résultats chiffrés des indices par rapport à la réalité de terrain par la suite. Cette dernière étape a été effectuée grâce aux cartes d'occupation du sol de la zone d'étude (figure 43 et 46), résultantes de l'analyse du chapitre IV ainsi qu'aux cartes topographiques (figure 4, 5, 6), élaborées à partir du modèle numérique de terrain chapitre I.

Les indices en questions se résument dans l'indice normalisé de végétation « NDVI », indice de végétation par différence normalisé du vert « GNDVI », l'indice de stress hydrique « NDWI », le ratio simple « SR », Indice de surfaces brûlées « BAI », et *Normalized Burn Ratio* « NBR ».

CHAPITRE V : Caractérisation spectrale des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental et leur dynamique

Le Tableau 27 présente les expressions mathématiques des indices utilisés, où ;

NIR : réflectance dans la bande « proche infrarouge »

R : réflectance dans la bande « rouge »

V : réflectance dans la bande « vert »

SWIR1 : réflectance dans la bande « infrarouge moyen 1 »

SWIR2 : réflectance dans la bande « infrarouge moyen 2 »

Tableau 27. Présentation des indices utilisés.

Indice	Equation	Utilité	Références
NDVI	$\frac{NIR - R}{NIR + R}$	Identification de la végétation verte et mesure de son état sanitaire.	Tucker (1979), Rouse <i>et al.</i> (1973)
GNDVI	$\frac{NIR - V}{NIR + V}$		Gitelson et Merzlyak (1996 ; 1998)
SR	$\frac{NIR}{R}$		Jordan (1969)
NDWI	$\frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	Mesure d'état hydrique.	Gao (1996)
BAI	$\frac{1}{(0,1 - R)^2 + (0,06 - NIR)^2}$	Détection de changement de l'activité photosynthétique de la végétation suite au passage du feu.	(Chuvienco <i>et al.</i> , 2002)
NBR	$\frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$		(Lopez Garcia et Caselles, 1991)

L'indice de végétation par différence normalisé NDVI est l'un des indices simples, les plus anciens, les plus connus et le plus utilisé. Il utilise la différence normalisée entre les réflectances dans l'infrarouge et dans le rouge.

Le GNDVI ou *Green NDVI* est un indice similaire à l'indice normalisé de végétation, sauf qu'il mesure le spectre vert au lieu du spectre rouge. Ce qui lui rend plus sensible à la concentration en chlorophylle que le NDVI.

L'indice de stress hydrique NDWI est l'un des indices simples, utilisé pour le suivi de la végétation, plus particulièrement en état de stress hydrique, par le fait que ce dernier varie en fonction de la teneur en eau des feuilles.

Le ratio simple SR est un indice aussi bien connu que largement utilisé. Il est décrit comme un rapport entre les réflectances dans le domaine du proche infrarouge et dans du rouge.

Le BAI et NBR sont des indices qui permettent de mettre en évidence le changement de l'activité photosynthétique de la végétation suite au passage du feu.

L'indice des surfaces brûlées BAI est un indice qui révèle les zones brûlées dans les images post-feu en utilisant les réflectances dans le domaine du rouge et d'infrarouge.

L'application de cet indice nécessite au préalable une calibration de données en réflectance.

L'indice est calculé à partir de la distance spectrale de chaque pixel à un point spectral de référence, où les zones récemment brûlées convergent, pour faire ressortir le signal du charbon de bois. Les pixels plus lumineux indiquent les zones brûlées.

L'indice de feu ou Ratio de feu normalisé NBR est un indice similaire à l'indice normalisé de végétation *NDVI*, sauf qu'il mesure l'infrarouge à ondes courtes au lieu du spectre rouge.

L'indice NBR a été initialement développé pour être utilisé avec les bandes 4 et 7 de *Landsat TM* et *ETM+*, mais il fonctionne avec n'importe quel capteur multispectral avec le domaine proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes pour faire apparaître les zones incendiées de superficie supérieure à 500 acres (soit plus de 200 Hectares d'environ). Les pixels plus foncés indiquent les zones brûlées.

Le processus méthodologique se résume par l'organigramme suivant :

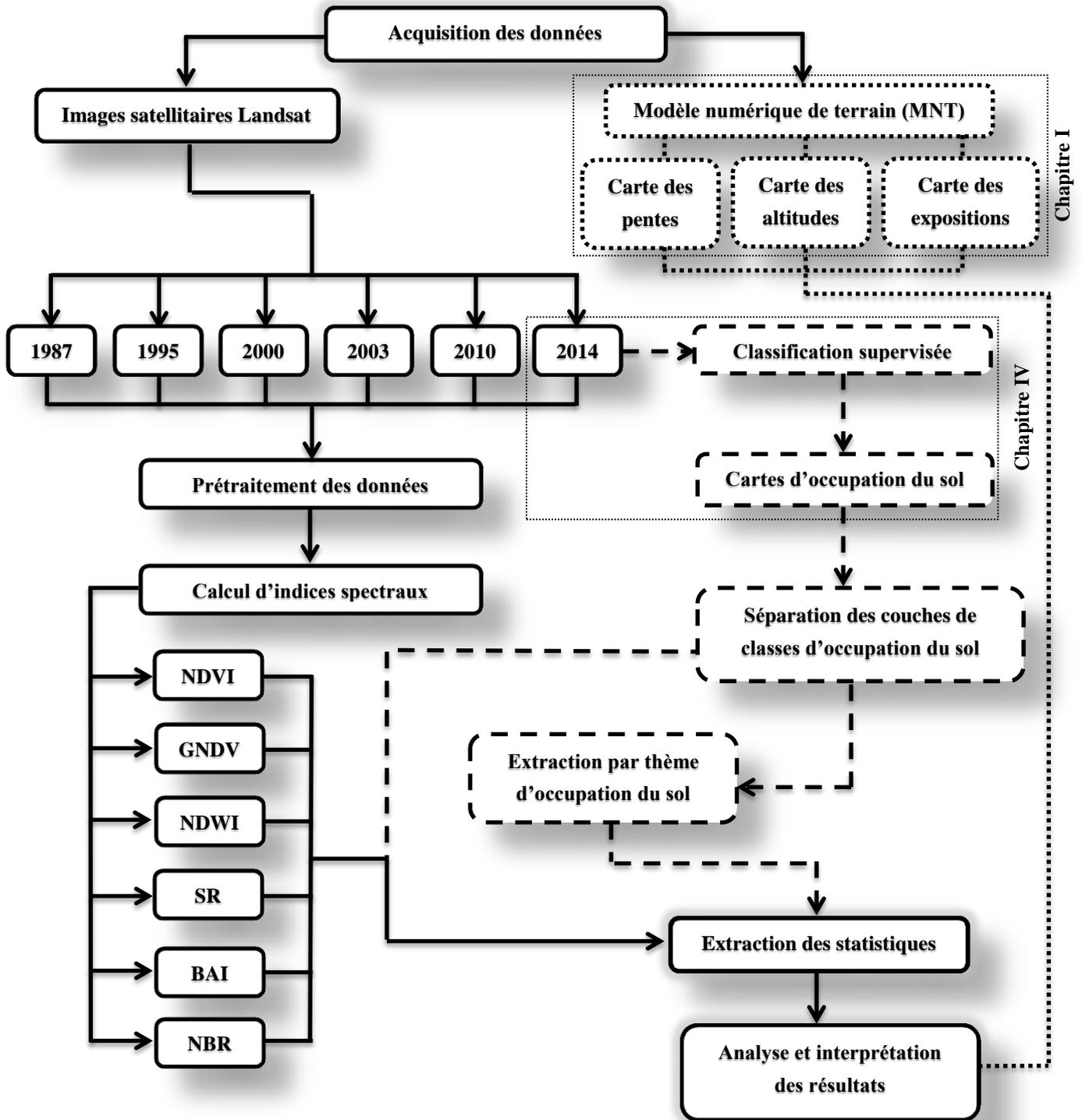


Figure 47. Organigramme de la démarche méthodologique.

Résultats et discussion

1. Les indices bruts

1.1. Statistiques descriptives des indices spectraux

Les informations quantitatives liées à la réponse spectrale des massifs forestiers étudiés sont recueillies à partir des tables attributaires obtenues pour les deux massifs forestiers ; massif de

CHAPITRE V : Caractérisation spectrale des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental et leur dynamique

Ouled Yagoub et celui des Beni Imloul. Ces informations ont fait l'objet d'une synthèse descriptive, les résultats qui en découlent sont récapitulés dans les tableaux 28 et 29 puis ils sont regroupés par paramètre et par indice sous forme graphique, dans les figures 48, 49, 50, 51 et 52.

Tableau 28. Récapitulatif des statistiques descriptives des signatures spectrales multi temporelles du massif de Ouled Yagoub.

Indices OY		NDVI	NDWI	GNDVI	SR	NBR	BAI
Minimum	1987	-0,35	-1,00	-1,00	0,48	-1,00	0,59
	1995	-0,60	-0,77	-0,53	0,25	-0,73	0,59
	2000	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	-1,00	0,59
	2003	0,00	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	0,59
	2010	-0,32	-0,33	-0,47	0,52	-0,35	0,59
	2014	-0,56	-0,37	-0,55	0,28	-0,44	0,59
Maximum	1987	0,79	0,50	0,77	8,57	0,74	249,15
	1995	0,90	0,60	1,00	19,08	0,77	30 111,42
	2000	0,86	0,54	0,82	12,83	0,77	277,58
	2003	1,0	0,34	0,66	4,49	0,55	83,40
	2010	0,77	1,00	0,78	7,80	1,00	90 497,58
	2014	0,83	0,49	0,80	10,93	0,71	20 424,83
Moyenne	1987	0,15	-0,02	0,19	1,51	0,04	11,96
	1995	0,16	-0,01	0,20	1,56	0,05	14,84
	2000	0,16	-0,004	0,20	1,58	0,05	11,12
	2003	0,14	0,002	0,18	1,44	0,055	10,95
	2010	0,16	0,001	0,19	1,59	0,062	12,64
	2014	0,16	0,001	0,20	1,60	0,07	13,39
Déviatiion standard	1987	0,19	0,07	0,23	0,76	0,10	16,67
	1995	0,20	0,07	0,24	0,84	0,11	34,77
	2000	0,20	0,07	0,24	0,88	0,11	14,69
	2003	0,17	0,06	0,21	0,59	0,10	13,34
	2010	0,20	0,07	0,23	0,83	0,12	91,72
	2014	0,21	0,07	0,25	0,94	0,13	28,40

CHAPITRE V : Caractérisation spectrale des écosystèmes forestiers à pin d'Alep de l'Aurès oriental et leur dynamique

Tableau 29. Récapitulatif des statistiques descriptives des signatures spectrales du massif des Beni Imloul.

Indices BI	NDVI	NDWI	GNDVI	SR	NBR	BAI	
Minimum	1987	-0,04	-1,00	-1,00	0,93	-1,00	0,59
	1995	-1,00	-1,00	-1,00	0,00	-1,00	0,59
	2000	-0,45	-0,29	-0,35	0,38	-0,27	0,59
	2003	0,06	-0,22	0,15	1,13	-0,17	4,55
	2010	-0,13	-0,29	-0,09	0,77	-0,28	0,59
	2014	0,00	-0,29	0,00	1,00	-0,28	0,59
Maximum	1987	1,00	0,45	0,79	9,44	0,70	771,49
	1995	1,00	0,53	1,00	3,27	0,63	2220,84
	2000	0,77	0,62	0,89	7,69	0,72	633,84
	2003	0,49	0,20	0,52	2,92	0,38	97,81
	2010	0,74	0,30	0,72	6,55	0,55	3270,00
	2014	0,80	0,34	0,79	8,79	0,56	418,52
Moyenne	1987	0,11	-0,02	0,15	1,34	0,02	11,29
	1995	0,01	-0,03	0,14	0,94	0,01	14,13
	2000	0,10	-0,02	0,15	1,31	0,02	9,81
	2003	0,25	-0,03	0,33	1,68	0,09	55,20
	2010	0,12	-0,02	0,14	1,36	0,03	11,84
	2014	0,25	-0,03	0,14	1,26	0,01	10,84
Déviatiion standard	1987	0,15	0,05	0,20	0,50	0,06	16,95
	1995	0,14	0,05	0,19	0,09	0,05	22,92
	2000	0,15	0,04	0,20	0,47	0,06	14,91
	2003	0,07	0,06	0,06	0,27	0,09	24,48
	2010	0,16	0,05	0,19	0,53	0,07	16,89
	2014	0,10	0,06	0,18	0,43	0,06	16,87

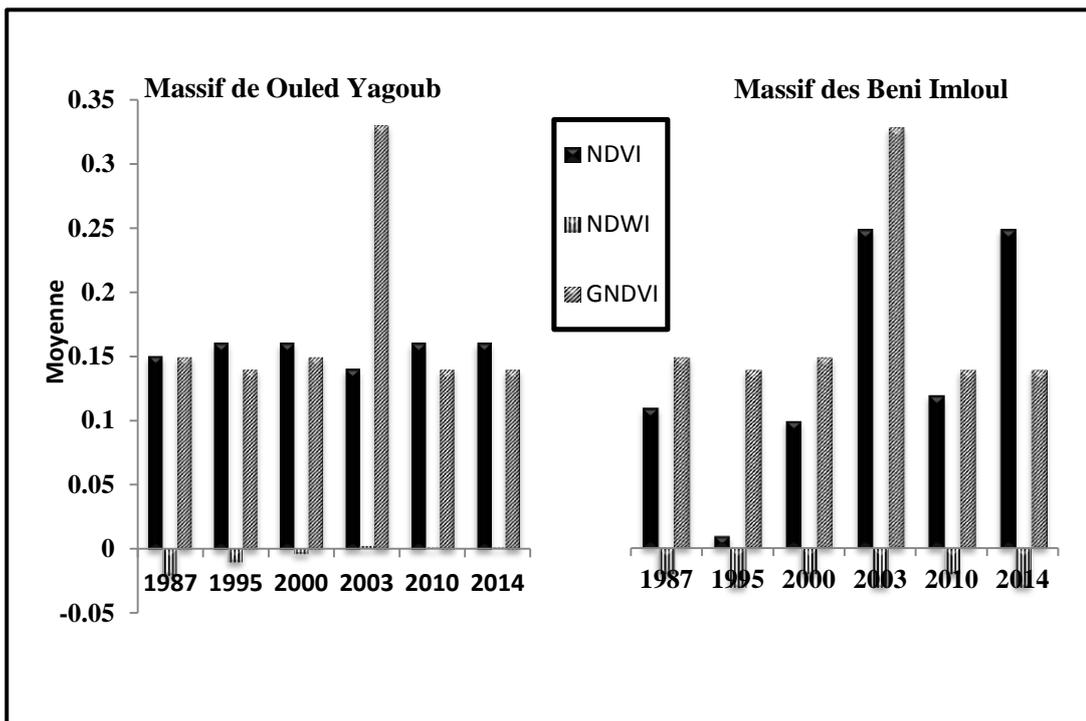


Figure 48. Histogrammes des valeurs moyennes des indices NDVI, NDWI et GNDVI.

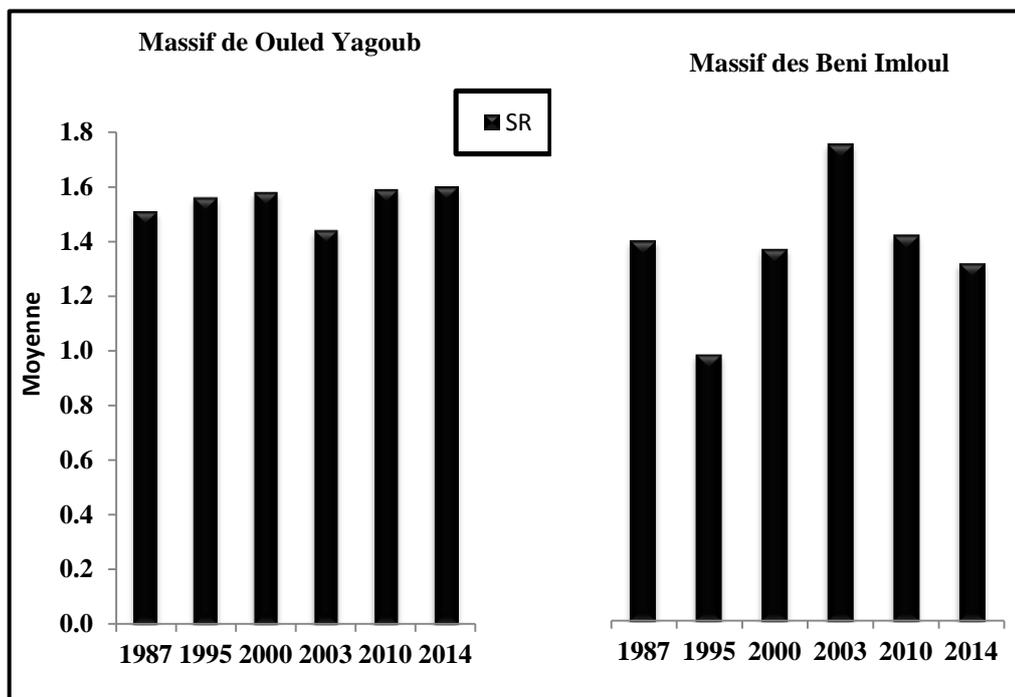


Figure 49. Histogramme des valeurs moyennes de l'indice SR

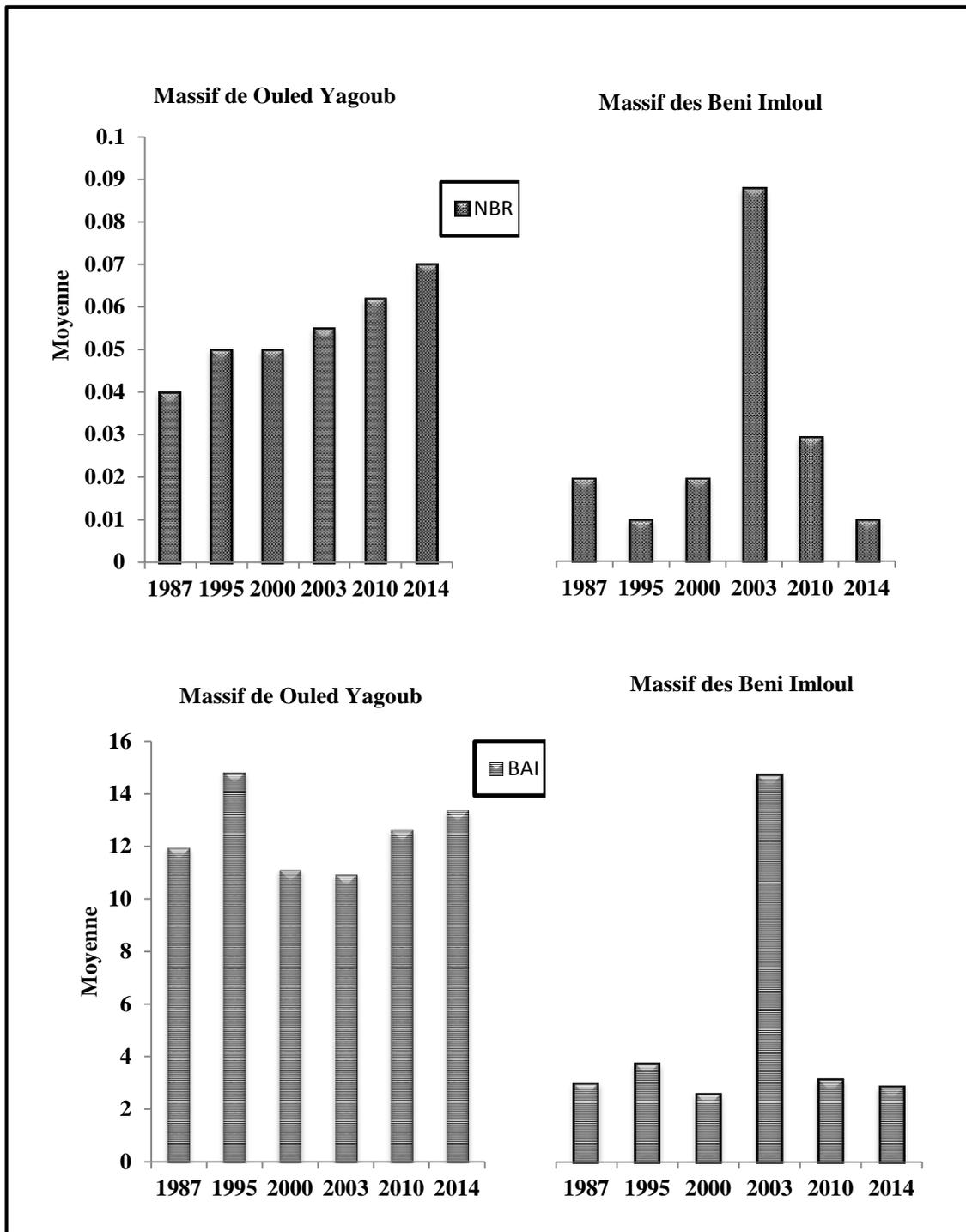


Figure 50. Histogramme des valeurs moyennes des indices des feux de forêt.

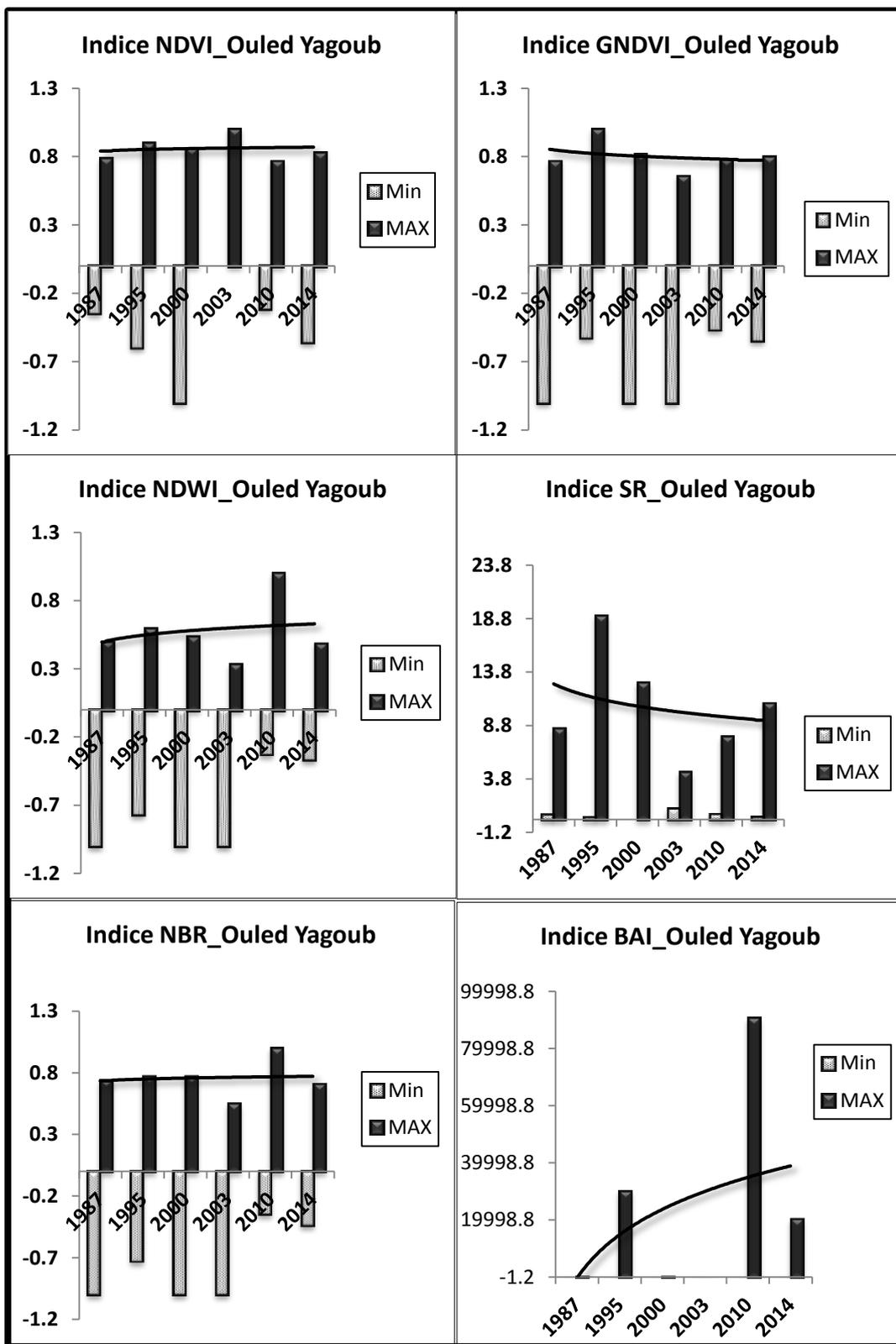


Figure 51. Histogrammes des valeurs extrêmes des signatures spectrales du massif de Ouled Yagoub.

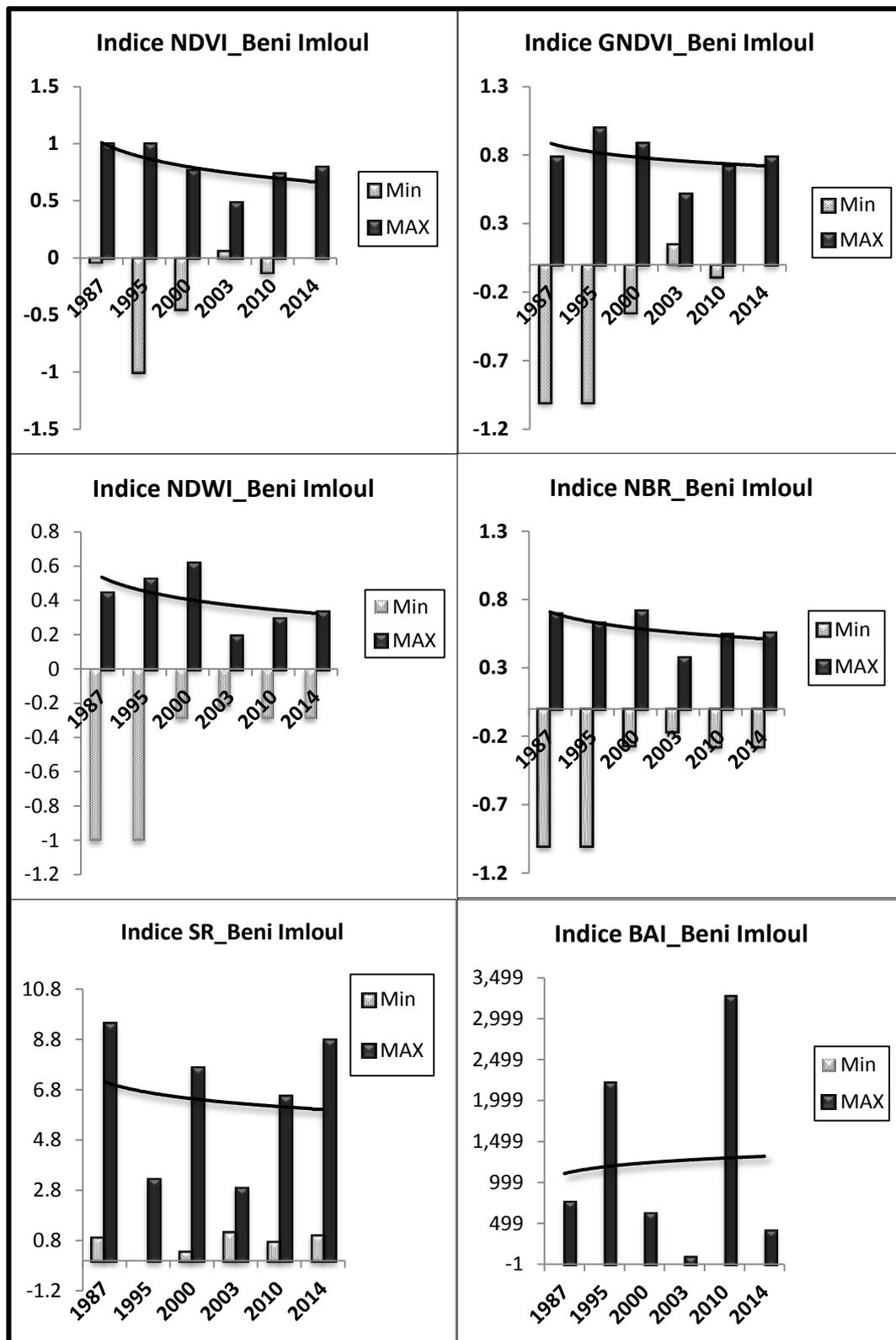


Figure 52. Histogrammes des valeurs extrêmes des signatures spectrales du massif des Beni Imloul.

À la lecture des figures 48, 49 et 50, il ressort que les valeurs des indices calculés pour la zone d'étude sont différentes d'une année à une autre. Cette différence interannuelle est essentiellement liée aux conditions environnementales.

Quant au massif de Ouled Yagoub qui se caractérise par une biodiversité plus importante et plus hétérogène que celle du massif des Beni Imloul, les résultats montrent une variation plus au moins irrégulière. Les histogrammes visibles aux figures 48, 49, 50 et 51 révèlent ainsi ce qui suit ;

– Le *BAI* présente une valeur minimale constante de l'ordre de 0,59 au cours de toutes les années d'observation, alors qu'il présente des valeurs maximales variantes d'une année à une autre. Les valeurs maximales extrêmes sont de l'ordre 90497,58, 30111,42 et 204244,83 enregistrées respectivement pour les années ; 2010, 1995 et 2014. Toutefois les autres années d'observation ont enregistré des valeurs maximales moindres, avec la valeur maximale la plus faible de 83,40, enregistrée pour l'année 2003.

Quant aux valeurs moyennes ; mise à part l'année 1995 qui prend la valeur moyenne la plus élevée, les résultats vont dans la même logique des valeurs maximales.

– Le *NDWI*, *GNDVI* et *NBR* présentent des valeurs minimales les plus basses de l'ordre de -1 lors des années 1987, 2000 et 2003. Pour les autres années d'observation que pour le paramètre « valeur maximale », les résultats de *NDWI* montrent une tendance similaire à celle de *NBR* et différente de celle du *GNDVI*.

– Le *NDVI* et le *SR* présentent des résultats de même tendance pour le paramètre « valeur maximale », avec des valeurs les plus élevées enregistrées en l'an 2003, et les valeurs les plus basses enregistrées en l'an 2000. Ces mêmes indices montrent des résultats très hétérogènes pour les autres paramètres.

Il est à noter que le *NDVI* est une version améliorée du *SR* et les résultats obtenus pour ces indices coïncident parfaitement par les résultats de l'étude dendrochronologique (du chapitre III) qui considère 2003 comme année très avantageuse à la croissance ligneuse, et 2000 comme année caractéristique négative à croissance la plus faible de toute la série expérimentée.

Quant au paramètre « valeur moyenne », les résultats montrent une certaine stabilité interannuelle de *NDVI* et de *GNDVI*, et une légère tendance à l'augmentation pour *NBR*, *SR* et *NDWI*.

Examinant les résultats relatifs au massif des Beni Imloul (figure 48, 49, 50 et 51), on aperçoit qu'à l'exception de l'indice spectral des feux de forêt (BAI), les valeurs minimales des indices calculés présentent une légère tendance à l'augmentation, alors que les valeurs maximales montrent une légère tendance à la baisse.

Cette tendance est conditionnée par des variations dans les conditions de milieu, et témoignerait par conséquent une évolution régressive du massif étudié. Ceci a été confirmé par la méthode de classification des images satellitaires procédée pour la zone d'étude (Garah *et al.*, 2016).

Quant à la moyenne, les valeurs enregistrées pour les indices calculés sont sensiblement constantes surtout pour l'indice *NDWI*. Toutefois des valeurs moyennes maximales sont enregistrées pour l'année 2003 comme suit ; 0,25, 0,33, 1,68, 0,09, 55,20 respectivement pour les indices ; *NDVI*, *GNDVI*, *SR*, *NBR* et *BAI*.

Ces résultats indiqueraient que parmi les années mises en analyse, c'est l'année 2003 qui a été l'année la plus opportune et la plus avantageuse à la croissance et au développement. Ce qui est déjà confirmé par l'analyse dendrochronologique (dans le chapitre III).

Les résultats de l'étude multi temporelle des indices étudiés ne suffisent pas pour tirer des conclusions sur l'évolution des massifs étudiés, par le fait du manque d'informations sur les indications et la signification des valeurs des indices calculés dans notre région d'étude, ce qui a rendu difficile l'explication et la discussion des résultats obtenus.

De ce fait, nous avons procédé nous même à l'extraction de la signification des valeurs des différents indices mis en analyse dans cette étude.

1.2.Classification des valeurs des indices et leur signification

Dans le but de déterminer les valeurs limites des indices spectraux calculés pour les différentes classes d'occupation du sol, et donc de décider la signification des valeurs de ceux-ci, ainsi que de comparer les indices spectraux entre eux, tout en exposant leurs avantages et limites ; une classification des valeurs des indices spectraux par thème d'occupation du sol a été procédée. Il est à signaler que la liste des classes d'occupation du sol n'est pas exhaustive, nous avons utilisé les thèmes les plus distinctifs et les plus dominants des massifs étudiés.

1.2. 1. Classification des valeurs des indices spectraux du massif de Ouled Yagoub par thème d'occupation des sols

En superposant la carte d'occupation du sol du massif de Ouled Yagoub figure 46, avec celles des différents indices spectraux calculés pour le massif, ainsi que celles des caractéristiques topographiques, plus précisément la carte altimétrique figure 4, la carte des pentes figure 5, et la carte des expositions figure 6, les conclusions suivantes ont pu être tiré ;

- *Les indices de végétation*

- **NDVI** ; les valeurs du NDVI calculé pour le massif de Ouled Yagoub oscillent entre une valeur minimale de -0,56 et une valeur maximale de 0,83, dans les détails ;
 - Les valeurs négatives (<0) présentent une superficie très réduite voir négligeable. Généralement, elles correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, tels que la neige, l'eau ou les nuages. Comme l'image satellitaire utilisée dans cette étude est acquise en pleine saison estivale, avec un ciel dégagé, les valeurs négatives enregistrées correspondent aux points d'eau. Ceci a été confirmé au moyen du programme *Google earth*.
 - Les valeurs positives situées entre **0** et **0,2** correspondent aux sols nus.
 - Les valeurs allant de **0,2** jusqu'à **0,25** englobent tout ce qui est sol nu ou sol couvert par une végétation herbacée, ainsi qu'une végétation clairsemée installée sur les expositions sud aux basses altitudes du massif, sur de faibles pentes.
 - L'intervalle [**0,25 ; 0,4**] exprime toute végétation installée sur des expositions strictement sud, y compris la végétation herbacée. C'est une végétation soumise à un stress hydrique. Ou sur des expositions nord-ouest toutefois installées sur des altitudes plus basses (entre 1100 et 1300 m).
 - Les valeurs variant entre **0,4** et **0,6** indiquent une couverture végétale dense et à état sanitaire moyennement convenable, ce qui coïncide avec les zones colonisées par la majorité des pinèdes du massif, le chêne vert, le frêne dimorphe, ainsi que le cèdre à l'état clairsemé.
 - Les valeurs comprises entre **0,6** et **0,7** qui témoignent les formations végétales à bon état sanitaire ; sont enregistrées pour la cédraie qui s'installe au sud du massif au-delà de 1900 m d'altitudes, comme pour la pinède, située aux

expositions nord à nord-est parfois ouest, entre 1300 à 1500 m d'altitude, avec quelques points exceptionnellement situés à plus de 1700 m d'altitude.

- Des valeurs supérieures à **0,7** qui déterminent une qualité sanitaire la plus remarquable du massif et/ou une densité la plus forte, avec une activité chlorophyllienne la plus intense ; sont exclusivement enregistrées pour les zones situées aux expositions nord à nord-ouest à plus de 1700 m d'altitude, sur des pentes extrêmes, abruptes à très abruptes. Ceci représente une partie minoritaire du total du massif, qui se localise surtout dans l'aire de répartition du cèdre, et encore dans la pinède ; plus précisément dans la partie extrême Est ainsi que sur le relief parallèle à la cédraie. En plus de quelques points correspondant au frêne dimorphe.

Il est à noter que le NDVI ne détecte pas les zones incendiées en tant que classe à part, il leurs situe entre 0 et 0,25.

- **NDWI** ; les valeurs obtenues pour le *NDWI* varient entre une valeur minimale négative de l'ordre de -0,37 et une valeur maximale positive de 0,49, dans les détails ;
 - Les valeurs négatives moins de **0,2** décrivent uniquement les zones incendiées. Le *NDWI* présente un très bon pouvoir séparateur de la classe zone incendiée.
 - Les valeurs négatives allant de - **0,2** jusqu'à - **0,1** correspondent à la fois au sol nu ou couvert d'une végétation herbacée.
 - Les valeurs négatives comprises entre **-0,1** et **-0,07** expriment surtout des maquis clairs ou parfois une végétation herbacée.
 - Les valeurs négatives allant de - **0,07** à - **0,01** révèlent les formations forestières claires situées surtout au sud du massif, mais aussi au nord du massif sur les expositions sud ou à basse altitude. Ces caractéristiques topographiques correspondent aux conditions d'existence difficiles favorisant ainsi le phénomène de dégradation.
 - Les valeurs situées entre **-0,01** et **0,1** correspondent aux quelques points épars dans la cédraie, la pinède, les formations à chêne vert et à frêne dimorphe.
 - L'intervalle [**0,1** ; **0,3**] exprime d'une part la réflectance de la cédraie située au-delà de 1700 m d'altitude, et d'autre part la pinède à partir de 1500 m d'altitude dans les versants des expositions nord, sur des pentes modérées jusqu'aux pentes extrêmes.

- Les valeurs supérieures à **0,3** correspondent uniquement à la cédraie située au-delà de 1900 m d'altitude, sur les versants de l'exposition nord, généralement sur des pentes très fortes, mais peut aller jusqu'aux pentes abruptes et très abruptes.
- **GNDVI** ; les valeurs de *GNDVI* vont de -0,55 à 0,80.
 - Les valeurs négatives (< 0) indiquent la présence d'eau sous forme liquide. Ces points d'eau couvrent une superficie très réduite (quelques pixels épars).
 - Les valeurs situées dans l'intervalle [**0 ; 0,3**] présentent une réflectance de la classe sol nu.
 - Les valeurs allant de **0,3** à **0,4** englobent toutes ce qui est végétation herbacée, sol nu ainsi que zone incendiée. Cet indice ne fait pas la distinction entre les réflectances de ces trois classes.
 - L'intervalle [**0,4 ; 0,5**] correspond à la réponse spectrale de la végétation herbacée à l'est et du pin d'Alep au sud-ouest.
 - Les valeurs oscillant entre **0,5** et **0,6** expriment une végétation de tout type, située dans les versants de l'exposition sud, sur des altitudes allant de 1100 m, avec une partie majoritaire qui commence à partir de 1300 m d'altitude.
 - Les valeurs variant entre **0,6** et **0,7** reflètent une végétation de tout type, située dans l'exposition nord, nord-ouest à ouest, au-delà de 1500 m d'altitude.
 - Les valeurs supérieures à **0,7** expriment un état sanitaire le plus satisfaisant du massif et reflètent ainsi une activité chlorophyllienne la plus intense. Ceci correspond majoritairement à la cédraie installée dans les expositions nord, nord-ouest parfois ouest, au-delà de 1900 m d'altitude, sur des pentes extrêmes à très abruptes. Ceci correspond également à la pinède installée sur des conditions topographiques similaires aux celles de la cédraie. Quelques pixels épars sont observés pour des altitudes de 1700 m au minimum.
- **SR** ; les valeurs extrêmes enregistrées pour le SR sont de l'ordre 0,28 et 10,93.
 - Les valeurs inférieures à **1,5** correspondent à la réponse spectrale du sol nu.
 - Les valeurs allant de **1,5** jusqu'à **2** expriment à la fois une végétation herbacée ainsi qu'une végétation clairsemée de basses altitudes installées dans les expositions sud à sud-est, sur des pentes faibles à modérées (5 et 15 %).

- L'intervalle [2 ; 4] correspond à la réponse spectrale d'une végétation à qualité sanitaire modérée suite au stress notamment hydrique au quelle elle serait soumise. C'est le cas de la partie majoritaire de la végétation du massif. C'est une végétation des expositions des versants sud à sud-est, installée sur les moyennes altitudes.
- Les valeurs comprises entre 6 et 4 présentent une végétation saine qui s'installe dans des expositions nord à nord-ouest rarement ouest, à partir de 1500 m, généralement sur de fortes pentes.
- Les valeurs supérieures à 6 représentent une végétation à très bonne qualité sanitaire, et à forte activité chlorophyllienne ; une végétation qui s'installe dans les versants nord à nord-ouest, à plus de 1700 m d'altitude, sur une pente très abrupte (non accessible à l'homme). Ceci ne représente qu'une tranche très réduite de l'ensemble du massif.

Il est à noter que le SR ne détecte pas la zone incendiée, il la considère comme étant un sol nu ou couvert par une végétation herbacée.

- *Les indices de feux de forêt*

- **BAI** ; le BAI a enregistré des valeurs allant de 0,59 jusqu'au 20424,83. Cet indice compte de **120** à **20 425** pour les zones incendiées.
- **NBR** ; les valeurs du **NBR** des Ouled Yagoub varient entre -0,44 et 0,71, les zones incendiées se situent entre **-0,44** à **-0,16**.

À l'inverse du BAI, le NBR présente un bon pouvoir séparateur entre les différentes classes d'occupation du sol ; cet indice compte

- De **-0,16** à **0** pour le sol nu,
- De **0** à **0,1** pour la végétation herbacée,
- De **0,1** à **0,3** pour les maquis, les matorrals, ainsi que pour la forêt très claire,
- De **0,3** à **0,5** pour la pinède adulte dense et/ou saine,
- De **0,5** à **0,7** pour la cédraie.

Il est à noter que la partie touchée par le feu se localise principalement au nord-est du massif, en pleine pinède, dans des zones situées dans les expositions nord à nord-ouest parfois ouest, mais rarement au sud ou sud-est, sur les pentes variant entre 15 et 30 % de la tranche

altitudinale de 1300 à 1700 m. Ce sont généralement les zones fréquentées par l'homme, sont les plus touchées.

1.2. 2. Classification des valeurs des indices spectraux du massif des Beni Imloul par thème d'occupation des sols

En superposant la carte d'occupation du sol du massif des Beni Imloul figure 43, avec celles des différents indices spectraux calculés pour le massif, ainsi que celles des caractéristiques topographiques, plus précisément la carte altimétrique figure 4, la carte des pentes figure 5, et la carte des expositions figure 6, nous pouvons tirer les conclusions suivantes ;

- *Les indices de végétation*

- **NDVI** ; les valeurs extrêmes enregistrées pour le NDVI des Beni Imloul sont de l'ordre de 0,00 et de 0,80, dans les détails ;
 - Le NDVI du massif des Beni Imloul n'a pas enregistré des valeurs inférieures à 0.
 - Les valeurs comprises entre **0** et **0,2** correspondent à la fois aux affleurements rocheux, au sol nu ou couvert par une végétation herbacée, ainsi qu'aux maquis très clairs.
 - Les valeurs de **0,2** à **0,3** représentent un enregistrement de la réponse spectrale de la pinède située au sud, ainsi qu'à la pinède claire du nord-ouest, en plus de la quasi-totalité du chêne vert du massif.
 - L'intervalle [**0,3** ; **0,6**] [corresponds à une superficie très réduite localisée surtout au nord du massif, entre 1500 et 1700 m d'altitude.
 - Les valeurs supérieures à **0,6** exposent un espace le plus favorable à la croissance, avec une activité chlorophyllienne la plus intense dans tout le massif.

Remarque : L'état de la plupart des individus du pin est modéré... Le nord est plus favorable à la croissance du fait des conditions climatiques et topographiques les plus propices ainsi que les conditions sylvicoles antiques.

- **NDWI** ; les valeurs de l'indice NDWI sont de l'ordre de -0,29 et de 0,34.
- Bien que, les valeurs négatives inférieures à **0,2** coïncident avec des zones classées comme étant maquis de chêne vert, la confirmation au moyen du programme *google earth* a révélé également la présence des troncs calcinés par terre. Ceci indique que cette classe de valeurs de NDWI qui présente une réponse spectrale des objets à très faible teneur en eau informe avec précision sur le passage des feux de forêt.

- Les valeurs comprises entre **-0,2** et **-0,15** correspondent aux zones occupées par des maquis très clairs situés à basse altitude (au-dessous de 1300 m).
- Les valeurs allant de **-0,15** jusqu'à **-0,1**, sont enregistrées au centre du massif pour les terres occupées par des maquis de chêne vert, ainsi qu'au sud-est et sud-ouest du massif pour les sols nus ou couverts par une végétation herbacée.
- Les valeurs situées dans l'intervalle **[-0,1 ; -0,07]** correspondent aux formations forestières claires à prédominance de taillis de chêne vert.
- Les valeurs variant entre **-0,07** et **0,15** expriment la réponse spectrale de la majorité du pin d'Alep du massif, occupant essentiellement des altitudes supérieures à 1500 m.

Au nord le pin d'Alep s'installe dans toutes les expositions, alors qu'il colonise uniquement les expositions nord, au sud du massif.

La pinède située au nord du massif, qui a autrefois subi un aménagement forestier, est constituée de pins bien venants localisés dans les altitudes les plus hautes du massif, généralement à plus de 1700 m d'altitude.

Au sud-ouest du massif, le pin d'Alep se trouve exclusivement sur une petite partie, dans les versants de l'exposition nord sur des pentes variant entre 10 et 30 % entre 1500 et 1700 m d'altitude.

- Les valeurs allant de **0,15** à **0,3** reflètent des conditions d'existence très favorables (à la croissance). Elles présentent une superficie très réduite, où la majorité se localise dans l'extrême nord-est du massif. Sur la tranche altitudinale, entre 1500 et 1700 m, sur les expositions des versants nord. Généralement sur des pentes qui dépassent 15 %.
- Des valeurs supérieures à **0,3** témoignant des conditions de croissance les plus favorables dans le massif, ne correspondent qu'à une superficie négligeable qui ne dépasse pas 2000 m², localisée au nord du massif.
- **GNDVI** ; l'intervalle du *GNDVI* calculé pour le massif des Beni Imloul est de [0,00, 0,79].
- Les valeurs négatives (**< 0**) qui sont enregistrées pour le massif des Beni Imloul pour une surface très réduite expriment une réponse spectrale de l'eau liquide. Celle-ci se présente sous forme de points d'eau artificiels de dimensions négligeables par rapport à la résolution de l'image satellitaire utilisée pour cette étude.

- Les valeurs positives inférieures à **0,3** correspondent à tout objet classé comme étant ; Affleurements rocheux, Sol nu ou couvert par une végétation herbacée. Le GNDVI ne fait pas la distinction entre ces classes.
 - Les valeurs allant de **0,3** jusqu'à **0,4** sont enregistrées pour le maquis ainsi que pour la pinède claire et/ou exposée aux stress notamment hydriques.
 - Les valeurs variant entre **0,4** et **0,6** expriment les zones occupées par la pinède pure et en mélange avec le chêne vert.
 - Les valeurs situées dans l'intervalle [**0,6 ; 0,7** [correspondent aux espaces très favorables à la croissance. Ces espaces qui se situent au nord-est du massif sont occupés par une végétation à activité chlorophyllienne très intense dans le massif.
 - Les valeurs supérieures à **0,7** correspondent aux espaces le plus favorables à la croissance, contenant une végétation à activité chlorophyllienne la plus intense dans le massif. Cette classe a été enregistrée pour une superficie aussi faible que les pixels relatifs à ces valeurs ne sont pas clairement perceptibles sur la carte.
- **SR** ; les valeurs du *SR* calculé pour le massif de Beni Imloul oscillent entre une valeur minimale de l'ordre de 1,00 et une valeur maximale de 8,79.
 - Les valeurs positives inférieures à **1,5** englobent les réflectances spectrales des affleurements rocheux, de Sol nu ou couvert par une végétation herbacée.
 - Les valeurs variant entre **1,5** et **2** sont enregistrées pour le pin situé au nord-ouest, ainsi qu'au sud du massif notamment aux altitudes basses qui ne dépasse pas 1300 m. Une vaste étendue est occupée par le chêne vert du nord de son aire de répartition dans le massif.
 - Les valeurs de l'intervalle [**2 ; 4** [correspondent à la pinède située au nord du massif, sur plus de 1500 m d'altitude quelle que soit l'exposition ou la pente. Ceci correspond à un espace très favorable à la croissance.
 - Les valeurs allant de **4** à **6** correspondent à une superficie très réduite localisée surtout au nord du massif à une altitude entre 1500 et 1700 m. Cette superficie hautement favorable à la croissance est occupée par le pin d'Alep.
 - Les valeurs supérieures à **6** sont enregistrées uniquement pour neuf « 9 » parcelles d'une superficie de 900 m² au maximum, réparties çà et là.

- *Les indices de feux de forêt*
 - **BAI** ; le **BAI** des Beni Imloul varie entre 0,59 et 418,52.
 - Les valeurs inférieures à **15** représentent des réponses spectrales des affleurements rocheux, de sol nu ou couvert par une végétation herbacée.
 - Les valeurs supérieures à **15** correspondent aux réponses spectrales de la végétation de tout type.
 - Les valeurs extrêmes maximales révèlent des traces des feux de forêt des années antérieures, par le fait qu'elles présentent une réponse spectrale des troncs carbonisés par terre.
- **NBR** ; le **NBR** du massif des Beni Imloul a enregistré des valeurs comprises entre - 0,28 et 0,56.
 - Les valeurs négatives inférieures à **0,16** présentent les zones soumises récemment à un incendie (troncs carbonisés par terre).
 - Les valeurs négatives supérieures à **0,16** correspondent aux affleurements rocheux, sol nu ou couvert par une végétation herbacée, ainsi qu'aux maquis clairs.
 - Les valeurs comprises entre **0** et **0,1** sont essentiellement relatives à la végétation herbacée ainsi qu'au maquis de chêne vert avec une couverture dense, et à la pinède de sud du massif.
 - Les valeurs allant de **0,1** à **0,3** coïncident avec l'aire de répartition de la quasi-totalité de la pinède du massif.
 - L'intervalle [**0,3 ; 0,5**] [corresponds à la zone la plus favorable à la croissance. Zone très réduite située principalement à l'extrême nord-est du massif, dans les expositions nord, sur des altitudes variant entre 1500 et 1700 m et parfois peut aller jusqu'à 1900 m d'altitude. Principalement sur des pentes variant entre 15 et 30 %.

Les valeurs supérieures à **0,5** n'ont pas été enregistrées pour le massif de Beni Imloul.

Récapitulatif

Il est à noter que les comportements spectraux des thèmes d'occupation du sol considérés dans cette étude varient d'un indice à un autre. Parmi tous les indices analysés, c'est le **BAI** qui présente le pouvoir séparateur le plus faible, il ne détecte que les zones incendiées en tant que classe distinctive, exprimée par des valeurs supérieures de 120. Par contre, le **NBR** présente un très bon pouvoir séparateur entre les différentes classes d'occupation du sol,

pendant qu'il est conçu pour la détection des feux de forêt. Quant aux autres indices spectraux, chacun montre une méthode d'estimation des éléments constitutionnels du paysage. Par conséquent, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients.

Le thème « végétation » est détectable à partir de 0,2, 0,4, -0,1, 2 et 0,1 respectivement pour le NDVI, GNDVI, NDWI, SR et NBR. Plus les valeurs tendent vers l'augmentation, meilleure sera l'activité chlorophyllienne. Une végétation dense, saine et à forte activité chlorophyllienne est exprimée par des valeurs positives.

Le thème « eau » n'est convenablement détectable que pour les indices de végétation NDVI et GNDVI, qu'ils l'expriment par des valeurs inférieures à zéro. Bien qu'il soit une mesure d'état hydrique, le NDWI ne détecte pas les points d'eau de superficies minimales (quelques pixels).

Dans la plupart des cas ; le thème « sol nu » se confond aux affleurements rocheux et au sol couvert par une végétation herbacée, pour des valeurs situées entre 0 et 0,2, entre 0 et 0,3, entre -0,16 et 0 ainsi que pour des valeurs inférieures à 1,5 respectivement pour le NDVI, GNDVI, NBR et le SR.

Bien que le thème « zone incendiée » est suffisamment détectable par les indices des feux de forêt, le NDWI présente également un très bon pouvoir séparateur de la classe zone incendiée que les autres indices ne l'ont pas.

2. Evolution spatio-temporelle des valeurs d'indices dans la zone d'étude

1. Evaluation diachronique de la réponse spectrale de la zone d'étude.

La spatialisation des changements dans la structure des deux forêts étudiées entre 1987 et 2014 est illustrée par les figures de 53 à 58.

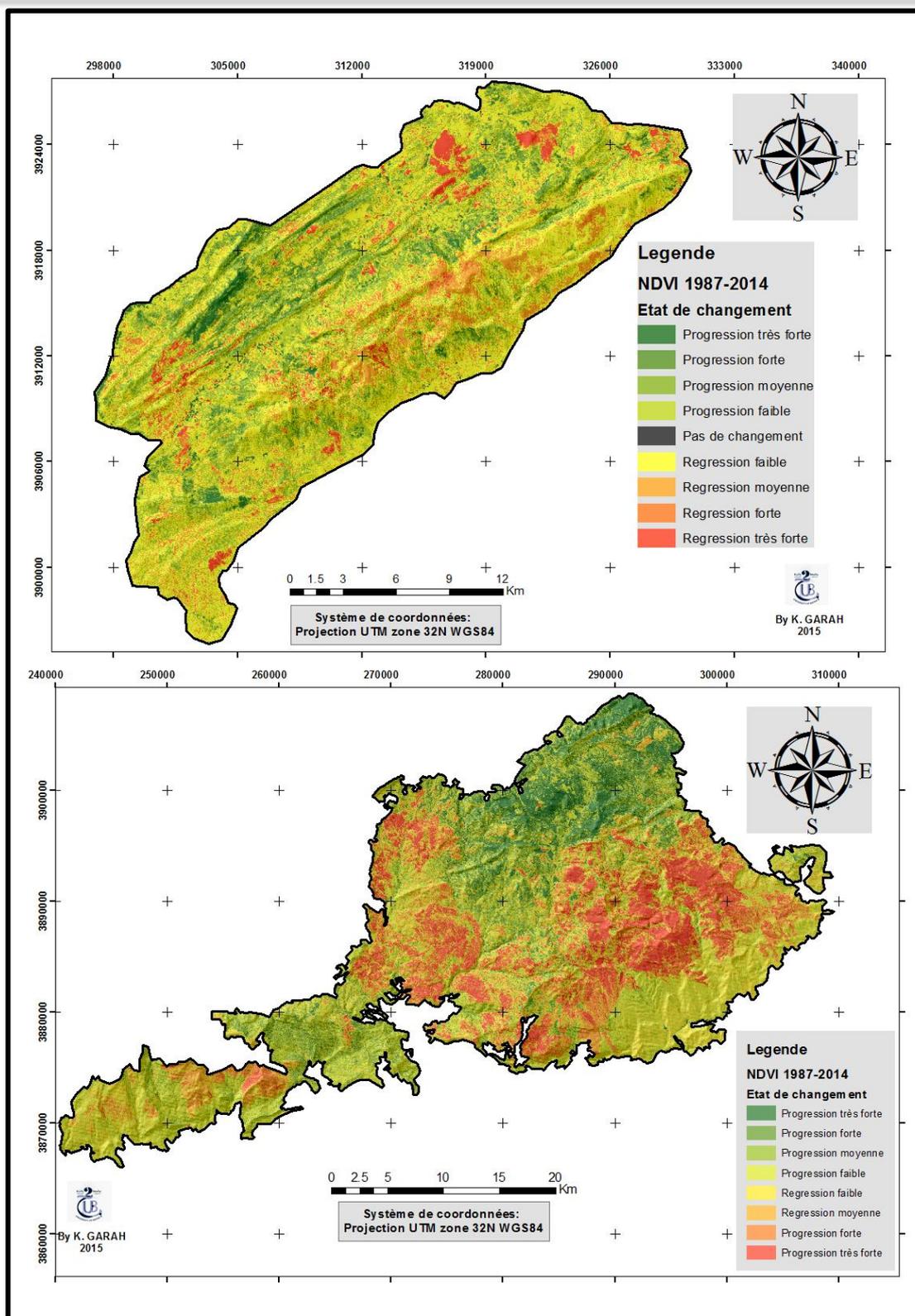


Figure 53. Carte des changements du NDVI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

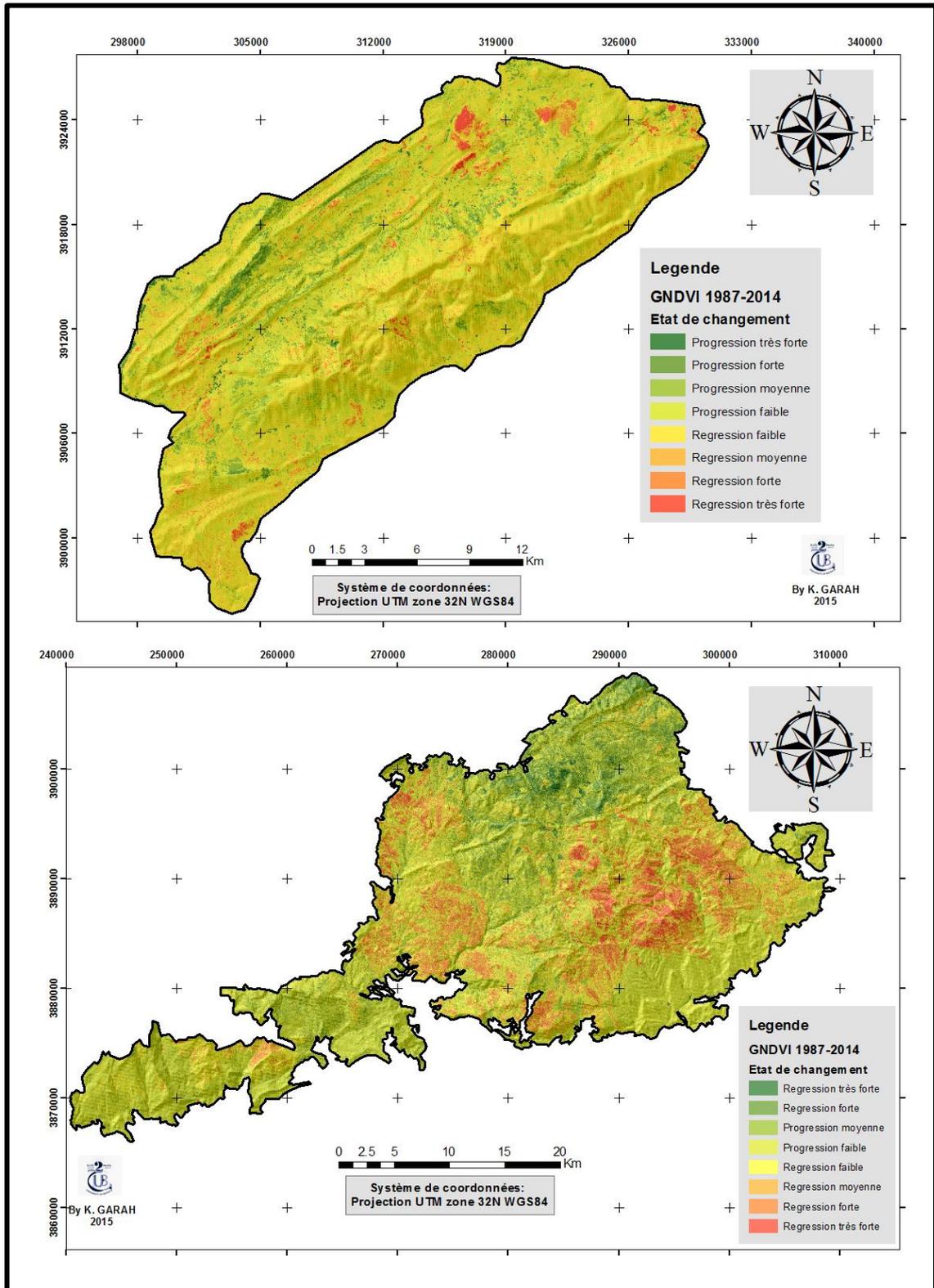


Figure 54. Carte des changements du GNDVI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

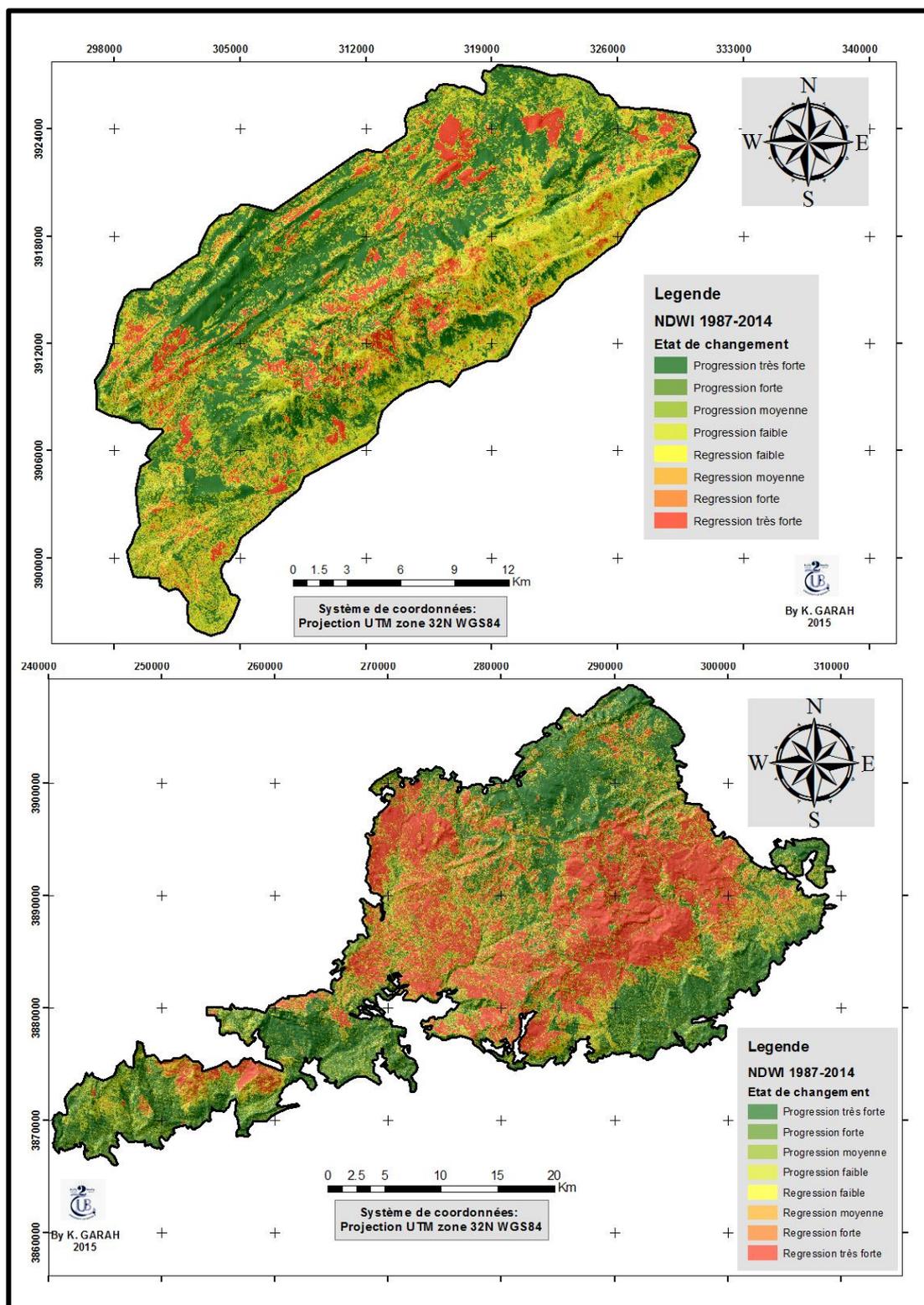


Figure 55. Carte des changements du NDWI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

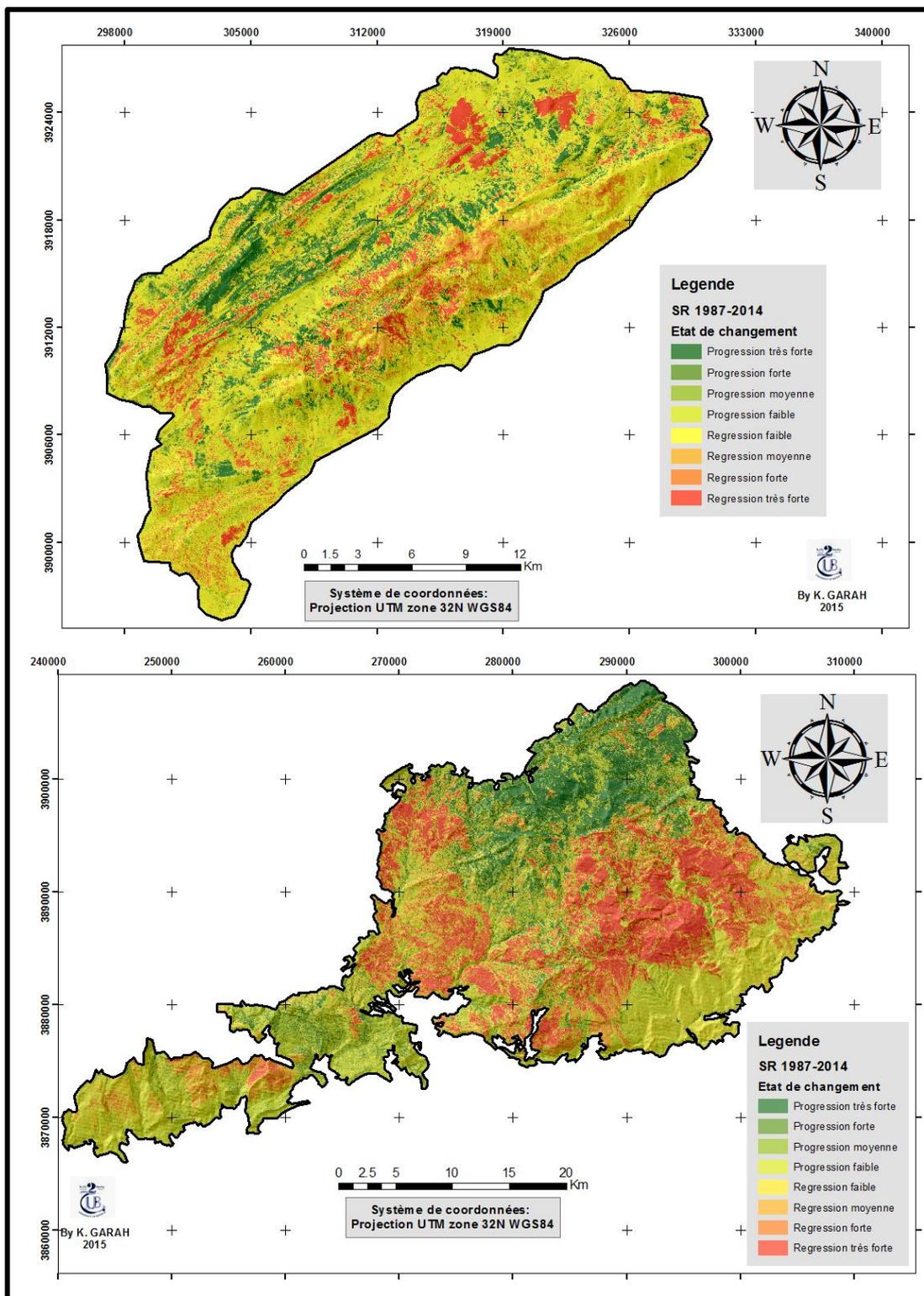


Figure 56. Carte des changements du SR détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

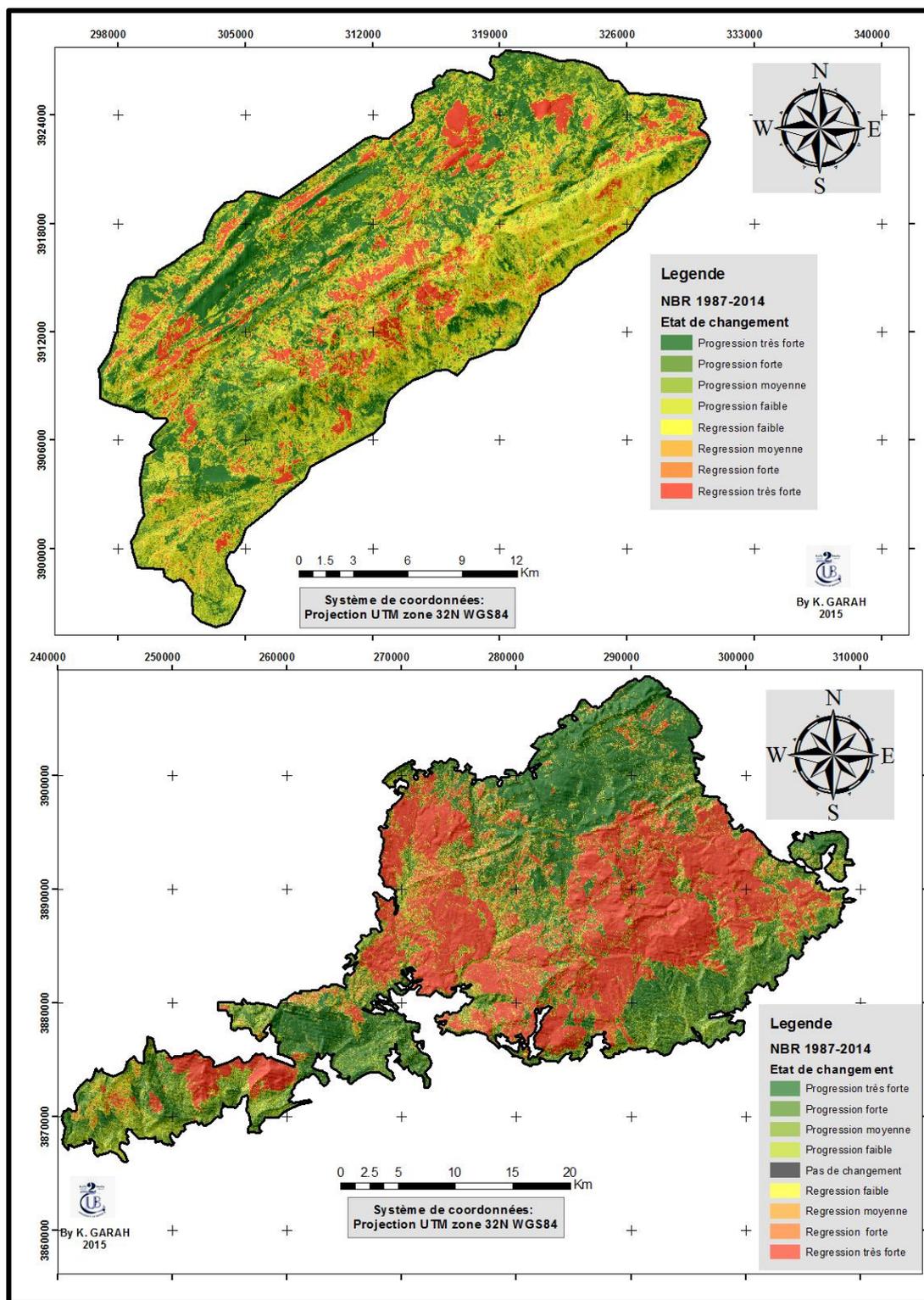


Figure 57. Carte des changements du NBR détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

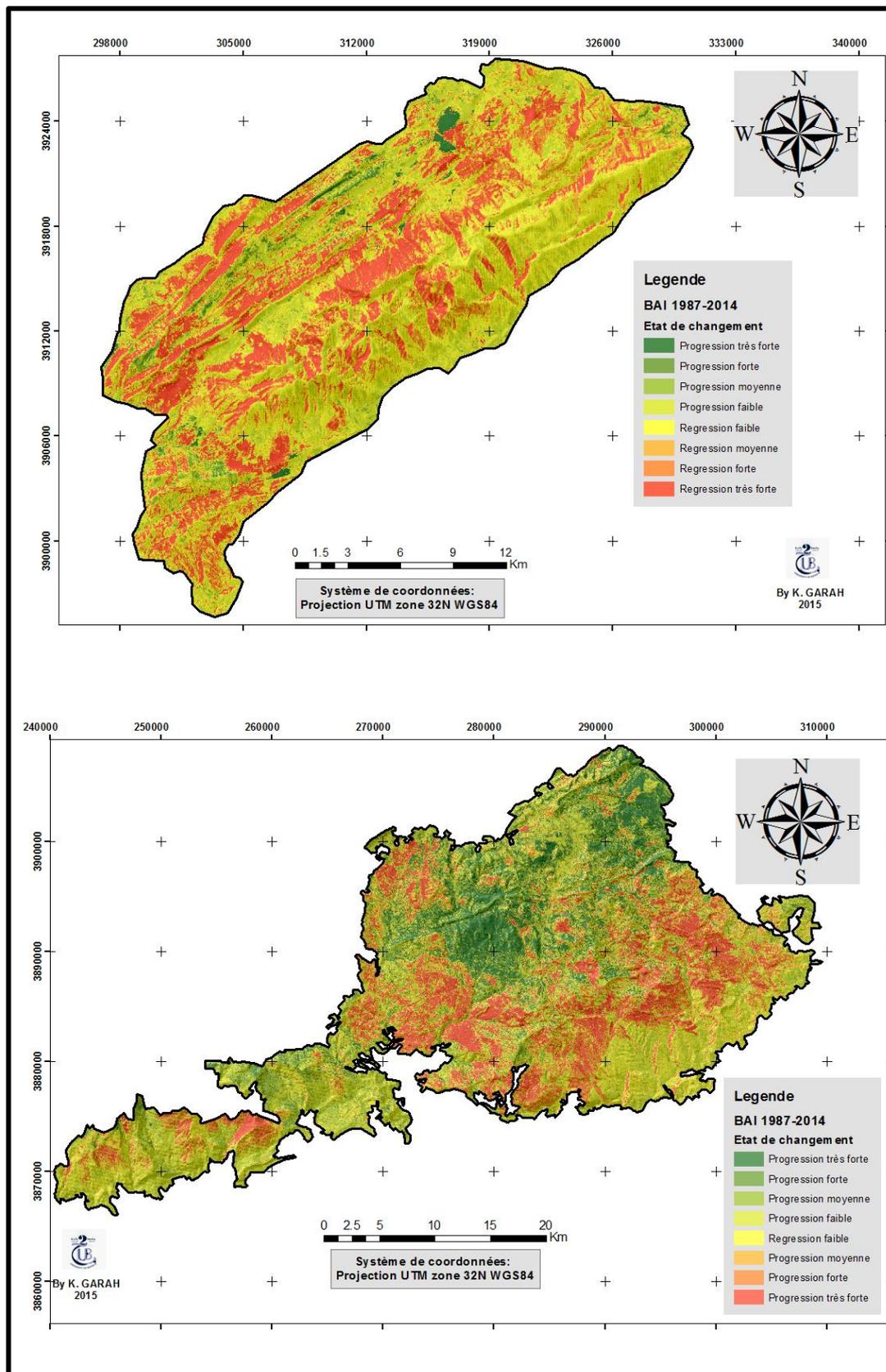


Figure 58. Carte des changements du BAI détectés pour les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul entre 1987 et 2014.

Le changement dans la composition des deux écosystèmes forestiers étudiés s'exprime à travers des classes, qui se sont utilisées pour discriminer les niveaux de l'intensité de l'évolution qui s'est opérée dans un laps de temps de 27 ans, entre 1987 et 2014. Tous les indices spectraux sélectionnés présentent une capacité de distinction entre quatre à cinq niveaux (classes de changement).

La classe pas de changement (de couleur noire), indique un état de stabilité absolue, avec une structure constante dans le temps tant dans l'espace, ce qui est très rare dans la nature, et effectivement ; les pixels de couleur noire correspondant à cette classe ne sont pas perceptibles sur cartes, car cette classe ne présente qu'une superficie très réduite.

La classe de régression faible et celle de progression faible correspondent aux modifications légères, qui peuvent être considérées comme évolution non significative.

La classe de régression moyenne, forte et très forte correspond à une dégradation plus ou moins accrue ;

À **Ouled Yagoub**, la régression se présente particulièrement par la dégradation qui affecte la pinède (surtout dans la partie nord du massif) que la cédraie (les taches en îlots dans la partie sud) dont la cause principale est respectivement, les feux de forêt récurrents et le dépérissement. Notant que les zones affectées par la dégradation se localisent dans des conditions climatiques les plus avantageuses du massif (cartes climatiques du chapitre II).

À **Beni Imloul**, il est à signaler que la régression est liée aux pertes d'énormes surfaces de pin d'Alep et d'une importance moindre de chêne vert suite aux incendies qui constituent le facteur de dégradation le plus redoutable de la forêt. En 2012 le massif des Beni Imloul a subi un très grand incendie qui a ravagé plus de 6000 ha, selon les chiffres administratifs.

Il est à noter que la régression dans les deux massifs est liée également aux actions anthropiques présentées par les défrichements qui sont exercées par la construction des bâtisses ainsi que la création de vergers d'arbres fruitiers qui se sont multipliés ces dernières années à la limite marginale de la forêt.

La classe de progression moyenne, forte à très fortes correspond à une amélioration plus ou moins marquante dans le couvert végétal (sauf pour le BAI qui prend des valeurs extrêmes pour une dégradation par des feux de forêt).

À **Ouled Yagoub**, la progression prétendant le massif est observé au nord-ouest et surtout au sud, et s'exprime ainsi par une augmentation des superficies occupées par le chêne vert, et du frêne dimorphe qui commencent à prendre de l'ampleur aux dépens des espèces dominantes « le pin d'Alep » et « le cèdre de l'Atlas ».

Cette expansion spectaculaire du frêne dimorphe dans le massif de Ouled Yagoub a été déjà mise en évidence par deux études récentes ; Chafai (2016) et Beghami et *al.*, (2012) sur l'occupation du sol dans la zone de Ouled Yagoub et de Beni Oudjana.

Selon ces mêmes études, la progression du frêne dimorphe et du chêne vert est essentiellement naturelle. Cette évolution est localisée principalement sur les terrains abandonnés par l'agriculture, mais aussi sur les sols nus. Ces deux espèces possèdent un caractère concurrentiel très remarquable. En effet, nous avons remarqué qu'elles s'installent dans les endroits où l'étage dominant occupé par le cèdre de l'Atlas a complètement disparu suite au déperissement et aux défrichements de la forêt.

À **Beni Imloul**, la progression se manifeste essentiellement dans la partie nord du massif qui se caractérise par des conditions climatiques les plus avantageuses à travers tout le massif avec un type de climat exceptionnellement humide et subhumide (cartes climatiques du chapitre II). Cela s'expliquerait par un développement du pin d'Alep ; des surfaces occupées autrefois par le chêne vert et d'autres formations sont maintenant colonisées par le pin d'Alep. Cette transformation est liée très probablement à l'efficacité des actions sylvicoles surtout les coupes de régénération pratiquées dans les années 1980. Ces coupes réalisées sur de petites surfaces ont permis de dégager l'étage dominant et de desserrer le peuplement progressivement jusqu'à l'installation de la régénération, qui a été quasiment nulle à cette époque (Abdessemed, 1984).

La comparaison visuelle des cartes des cinq indices sélectionnés révèle une diversité dans la distribution spatiale de l'intensité du changement qui a affecté les deux (entités géographiques) écosystèmes forestiers étudiés. La validation des résultats par rapport à la vérité terrain montre que le SR et le NDVI permettent un très bon pouvoir séparateur entre les différents niveaux d'évolution spatiotemporelle des types de végétation qui caractérisent les écosystèmes forestiers aurasiens semi-arides.

Quant aux NBR et NDWI, ils donnent pratiquement le même résultat. Ils possèdent un bon pouvoir séparateur entre les différents niveaux d'évolution spatiotemporelle des types de

végétation. Toutefois, ils détectent le moindre changement ce qui engendre des confusions dans l'estimation de l'ampleur du changement.

Le GNDVI; c'est l'indice adéquat pour la détection des changements extrêmes dans le paysage.

Le BAI, c'est l'indice le moins adéquat aux évaluations des changements dans l'occupation du sol.

Conclusion

Cette étude a permis l'analyse diachronique à travers la cartographie des changements, cette dernière constitue une démarche efficace permettant une évaluation rapide à travers une cartographie mettant en relief la dynamique de l'occupation des sols et ses répercussions sur la couverture végétale.

En conclusion, l'utilisation des indices spectraux dans le suivi de l'évolution spatiotemporelle vient confirmer les résultats obtenus par la démarche de comparaison des classifications supervisées et qui a révélé une altération de l'écosystème forestier aurasien par une forte dégradation

Il ressort également que tous les indices spectraux sélectionnés pour cette étude ont la possibilité de distinguer la sévérité des changements dans l'espace au fil du temps.

CHARITRE VI

Modélisation de la distribution
potentielle actuelle et future du pin
d'Alep dans la région des Aurès

Introduction

Les changements dans l'occupation des sols comptent parmi les principales causes de la perte de biodiversité. Ainsi, à l'instar de toutes les formations forestières de la région des Aurès, les conclusions de l'analyse de l'évolution spatio-temporelle du pin d'Alep de l'Aurès oriental (chapitre V, Garah *et al.*, 2016) montrent une tendance évolutive régressive plus ou moins profonde. Cette évolution serait considérablement précipitée et amplifiée par les probables changements climatiques.

Dans un contexte de changements globaux, localiser les espèces est devenu indispensable pour les protéger et pour garantir leur durabilité. En effet, connaître leur distribution spatiale permet de mieux analyser leurs besoins, leur sensibilité à des facteurs environnementaux actuels, et prédire leur réponse spatio-temporelle potentielle aux conditions environnementales futures.

De ce fait, plusieurs travaux qui ont été entrepris en écologie dans différentes régions dans le monde, s'intéressent de la modélisation et la prédiction de la distribution des espèces végétales et animales. Guisan et Thuiller (2005) ont considéré que la prédiction de la distribution des espèces offre plus que les modèles simples d'habitat, et qu'il existe plusieurs méthodes de modélisation de la distribution des espèces. Parmi ces méthodes de modélisations se rangent les modèles de maximum d'entropie, comme le modèle *MaxEnt* (Phillips *et al.*, 2004 ; Phillips *et al.*, 2006 ; Phillips et Dudik, 2008 ; Elith *et al.*, 2011) ; une approche statistique jeune qui correspond à une loi de probabilité permettant de prendre en compte un maximum d'incertitude dans le processus de modélisation. Cette modélisation est réalisée à partir de données observées et en fonction de contraintes connues.

Bien qu'il compte parmi les méthodes récemment développées et qui ne sont pas encore éprouvées que d'autres modèles plus traditionnels, tels que les modèles linéaires généralisés ou les modèles additifs généralisés, et qu'il existe moins de ressources pour faciliter son utilisation, le modèle *MaxEnt* s'est montré parmi les plus performants pour la prédiction de la distribution des espèces (Elith *et al.* 2006, Reiss *et al.*, 2011, Fuller *et al.*, 2012). *MaxEnt* est également l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour faire des projections des changements dans la distribution des espèces selon divers scénarios de changements climatiques (Garcia *et al.*, 2013, Yang *et al.*, 2013, Remya *et al.*, 2015).

Il est particulièrement parfaitement adapté aux études en écologie par le fait de l'approche corrélative pour la prise en compte des variables environnementales dans la probabilité de présence d'une espèce (Elith et Leathwick, 2009).

De nombreuses études de la littérature scientifique de la distribution spatiale potentielle des espèces animales (Peck *et al.*, 2010 ; De Souza et Delabie, 2013 ; Thomas *et al.*, 2015) et végétales (Rupprecht *et al.*, 2011 ; Mbatudde *et al.*, 2012 ; Gbesso *et al.*, 2013 ; Aguirre-Gutierrez *et al.*, 2014 ; Barredo *et al.*, 2015 ; Gnagbo *et al.*, 2015 ; Lopez-Tirado et Hidalgo, 2015) sont basées sur la modélisation *MaxEnt*. Toutefois aucune étude de ce genre n'a été menée en Algérie à ce jour.

Dans cet ordre d'idée, ce chapitre traite la modélisation de la distribution spatiale du pin d'Alep dans la région des Aurès par la méthode *MaxEnt*, la détermination des facteurs environnementaux essentiels qui participent à sa structuration géographique actuelle ainsi que la modélisation de la répartition spatiale potentielle future du pin d'Alep de la région d'étude, sous l'influence des scénarios du changement climatique récent prévus pour la région d'étude.

Matériel et méthodes

L'approche méthodologique retenue pour réaliser la modélisation est celle du modèle Maximum d'Entropie « *MaxEnt* ». Cette méthode de conception récente présente des caractéristiques intéressantes, en présentant l'avantage de ne tenir compte que des données de présence d'espèce, qui sont plus courantes en écologie que les données de présence-absence, et à l'utilisation de nombreuses variables en interaction (Pearson *et al.*, 2006).

Le processus de construction du modèle *MaxEnt* pour le pin d'Alep analysé dans cette étude est réalisé en utilisant le programme *MaxEnt* (*Maximum Entropy*) version 3.3.1 (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>) (Dudik *et al.*, 2011). Afin d'éviter un surajustement des données de test, nous avons fixé la valeur du multiplicateur de régularisation à 1. Ensuite, pour permettre de modéliser avec précision de nombreuses réponses complexes, des classes de propriétés linéaires, quadratiques et de charnières ont été sélectionnées (Merow *et al.*, 2013 ; Phillips et Dudik, 2008). Nous avons ainsi retenu 70 % des données pour la démonstration et les 30 % restants pour les tests. Un total de 100 passages a été fixé pour la construction du modèle (Flory *et al.*, 2012). Le nombre maximum de points de référence était de 10 000. Les autres valeurs ont été conservées par défaut.

Méthodologiquement, la modélisation *MaxEnt* étant relativement complexe, elle est fondée sur la dimension spatiale et sur l'approche multifactorielle ; qui veille à considérer la complexité des écosystèmes naturels et à analyser la diversité des facteurs qui interviennent dans leur caractérisation et influencent leur existence. Donc, la méthode utilise des données d'observations accompagnées de variables de contraintes environnementales.

A cet effet, la méthodologie adoptée faite intervenir des données bioclimatiques actuelles et futures spatialisées, fournies par la base de données *worldclim* (Hijmans *et al.*, 2005) et la base de données *africlim* (Platts *et al.*, 2015), les données sur le modèle numérique de terrain téléchargées à partir de la base de données *DIVA-GIS* <http://www.diva-gis.org/>, ainsi que les points de la distribution du pin d'Alep dans le massif des Beni Imloul et celui de Ouled yagoub, choisis depuis le résultat de la classification des images satellitaires *Landsat* dans le chapitre V (Garah *et al.*, 2016).

Le choix des variables environnementales à intégrer au modèle de distribution potentielle du pin d'Alep étudié, s'est opéré sur la base de disponibilité de variables ainsi que de leur lien avec les différentes contraintes écophysologiques des taxons du pin, et qui sont jugées avoir une valeur biologique significative (Nahal, 1962 ; Aguirre-Gutierrez *et al.*, 2015), compte tenu des différentes préférences bioclimatiques déclarées pour les taxons dans le genre *Pinus* ; plus particulièrement les températures moyennes des maxima du mois le plus chaud (Bio 5), les températures moyennes des minima du mois le plus froid (Bio 6), l'amplitude thermique présentée par l'isothermalité (Bio 3), les précipitations annuelles (Bio 12) ainsi que la saisonnalité des températures (Bio 4) et des précipitations (Bio 15) (Tableau 30).

Une attention particulière a été accordée au choix de l'échelle spatiale du jeu de données de calibration, alors, toutes les données environnementales sont prises à une résolution relativement fine, de l'ordre de 30 secondes (soit approximativement une grille de 1 km x 1 km).

Les couches de variables topographiques (altitudes) et bioclimatiques actuelles et futures disponibles pour l'Algérie, et qui ont été choisies pour faire tourner le modèle adopté, ont subi *antérieurement* un découpage sur les limites de la zone d'étude au moyen du logiciel *ArcGis*. Les données bioclimatiques futures comportent deux scénarios d'émission de Gaz à Effet de Serre, RCP (*Representative Concentration Pathways*) ; dont l'un optimiste (RCP 4.5) et l'autre pessimiste (RCP 8.5), ces derniers sont projetés à l'horizon de l'an 2055 et l'an 2085.

CHAPITRE VI : Modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès

Tableau 30. Les variables environnementales utilisées pour la modélisation du pin d'Alep des Aurès.

Abréviation	Dénomination de la variable	Unité	Explication
Bio3	Isothermalité	°C* 10	L'amplitude quotidienne moyenne/l'amplitude annuelle de la température.
Bio4	Saisonnalité de la température	°C* 10	Coefficient de variation des températures.
Bio5	Température maximale du mois le plus chaud	°C* 10	Moyenne des températures mensuelles du mois de janvier.
Bio6	Température minimale du mois le plus froid	°C* 10	Moyenne des températures mensuelles du mois de juillet.
Bio12	Précipitations annuelles	mm	Somme de toutes les précipitations mensuelles estimatives.
Bio15	Saisonnalité des précipitations	mm	Coefficient de variation des précipitations.
Alt2	Altitude	M	-

Les données d'observation correspondant à la répartition spatiale de l'espèce objet de l'étude sont représentées par plusieurs points de présence sur l'ensemble de pixels de la couche *Raster* de la zone d'étude. Ils couvrent tous la même emprise au pixel près, et pouvant être des variables continues ou des catégories (Phillips, 2012).

Le modèle produit par *MaxEnt* pour une espèce donnée est une suite continue de valeurs comprises entre 0 et 100 où, à une valeur plus élevée, correspond une probabilité plus élevée de rencontrer cette espèce (Guisan et Zimmermann, 2000).

Afin d'évaluer la qualité et la pertinence du modèle produit par *MaxEnt*, plusieurs analyses sont générées au cours de calcul du modèle. Les plus significatives sont l'AUC (*Area Under Curve*) et *jackknife*.

L'AUC exprime le rapport entre la sensibilité et la spécificité de la Courbe Caractéristique d'Opération ROC (*Receiver Operating Characteristic*) qui correspond au taux de positifs vrais (aucune erreur d'omission), par rapport au taux de faux positifs (erreur de prévision superflue). En évaluant ainsi la capacité du modèle à prédire correctement la présence de l'espèce, et où plus la valeur d'AUC, comprise entre 0 et 1, est importante, plus le modèle est loin d'être aléatoire, et qu'il sera approprié à la donnée étudiée. La valeur d'AUC pour un modèle aléatoire est de 0,5 (Phillips *et al.*, 2006).

Le test *jackknife* qui consiste à apprécier la contribution relative (%) des variables ayant participé à l'exécution du modèle de distribution produit par *MaxEnt*, en déterminant ainsi l'importance de la contribution de chaque variable au modèle.

Les résultats de probabilité de distribution générée par *MaxEnt* sous forme de fichiers format ASCII ont été importés dans le logiciel *ArcGIS* afin de les cartographier ainsi que les analyser statistiquement. La classification des différents niveaux d'habitats favorables au pin d'Alep a été faite à partir des seuils de probabilités logistiques de présence variant entre 0 et 1.

Résultats et discussion

L'exposition des résultats obtenus pour la modélisation de la distribution géographique actuelle et future du pin d'Alep de la région des Aurès et leur discussion est basée sur l'évaluation et la validation des modèles produits par *MaxEnt*, l'analyse de la contribution des différentes variables au développement des modèles, et enfin l'élaboration des modèles et leur présentation sous forme de cartes qui mettront l'accent sur la distribution géographique actuelle ainsi que l'influence des changements climatiques sur la distribution future du pin d'Alep de la région d'étude.

Évaluation et validation des modèles

Une évaluation des modèles est nécessaire avant toute analyse afin de savoir s'ils suivent un modèle aléatoire ou, au contraire, un modèle proche de la réalité. La qualité des modèles obtenus lors de cette étude est évaluée et validée au moyen de la statistique *AUC*.

Les valeurs moyennes de l'*AUC* résultantes de l'analyse de la distribution géographique actuelle et future du pin d'Alep de la région d'étude sont nettement supérieures au seuil de prédiction aléatoire (0.5) (Phillips *et al.*, 2006). Elles sont de l'ordre de 0,900 pour le climat actuel, alors que le climat futur a enregistré des valeurs de l'ordre de 0,899 et de 0,892 respectivement pour l'an 2055 et l'an 2085 des *RCP 4.5* et *RCP 8.5* (figure 59).

Ceci indique que les modèles produits par *MaxEnt* se sont montrés fiables, et la modélisation effectuée est considérée comme robuste. Ceci suggère aussi une bonne performance de l'algorithme *MaxEnt* à capturer les variations des données environnementales.

Contribution des variables environnementales aux modèles

L'importance de la contribution relative des variables environnementales considérées à la modélisation effectuée, a été évaluée au moyen du test *Jackknife* visible à la figure 60 et du calcul des pourcentages d'importance de permutation des différentes variables tableau 31.

La figure 60 présente en ordonnées les variables environnementales et en abscisse leurs contributions au calibrage du modèle. La barre devant chaque variable indique les performances du modèle lorsque ce dernier est tourné avec ladite variable seule (bleue) ou sans elle (verte). La barre rouge indique les performances du modèle tourné avec toutes les variables.

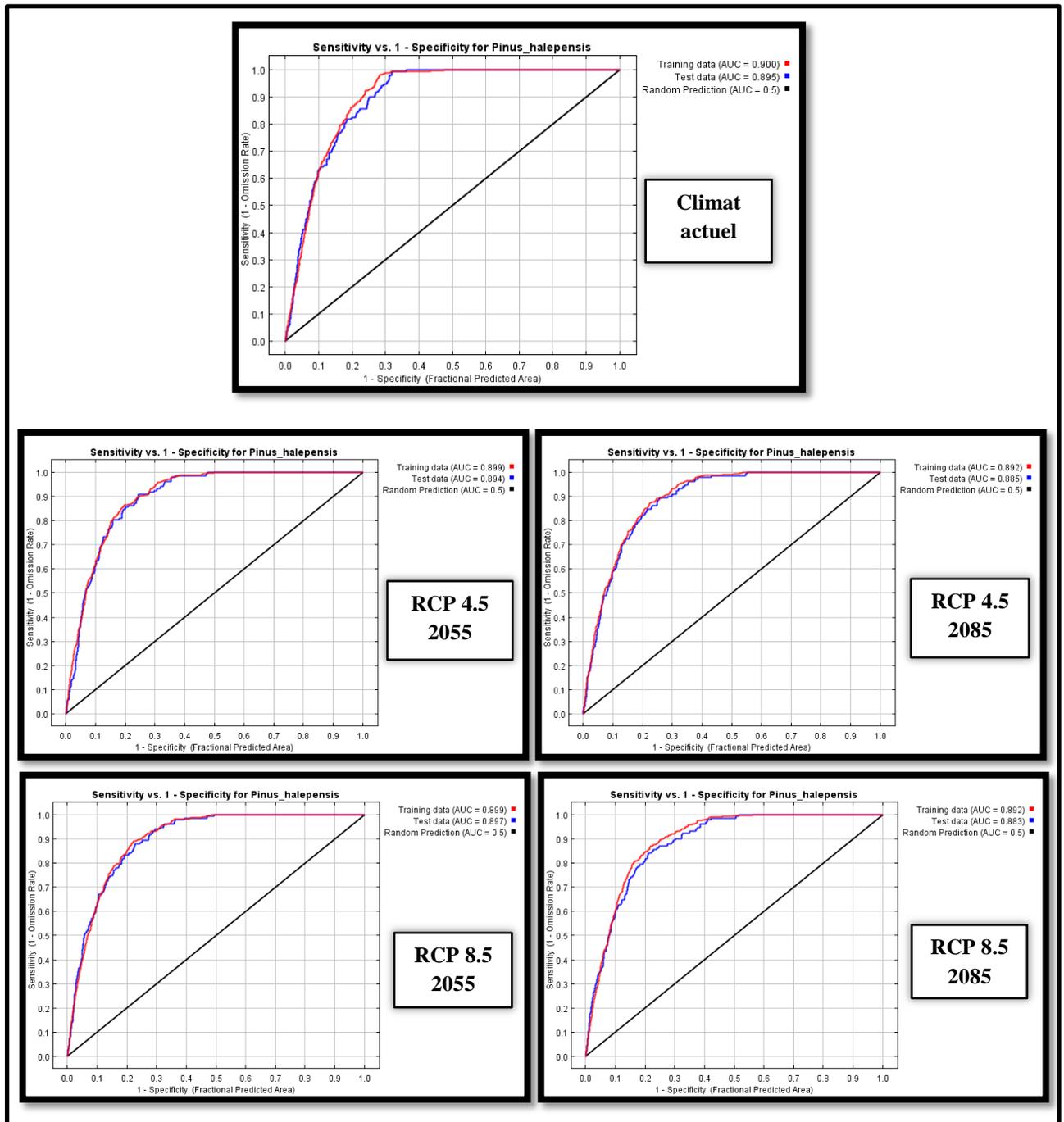


Figure 59. Courbes de la valeur moyenne de l'AUC sous l'aire de la Courbe Caractéristique d'Opération ROC (*Receiver Operating Characteristic*) du modèle de distribution actuelle et potentielle du pin d'Alep de la région des Aurès.

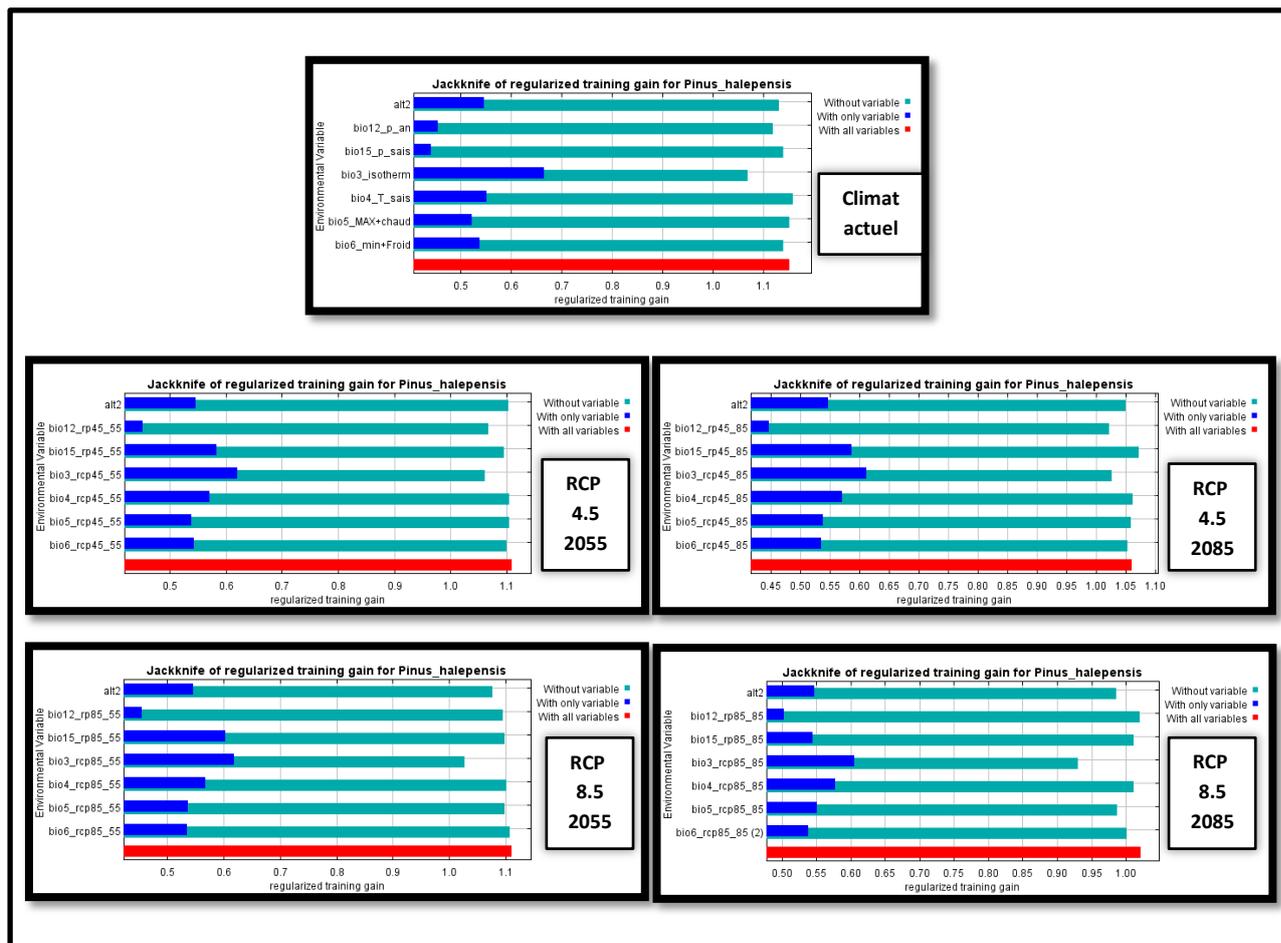


Figure 60. Importance relative de différentes variables environnementales en fonction des résultats de test *Jackknife* pour un gain de pin d'Alep.

L'analyse de *Jackknife* présentée à la figure 60 ainsi que l'estimation des contributions relatives des différentes variables environnementales visibles au tableau 31 montrent que la variable qui a contribué le plus au développement des différents modèles lorsqu'elles sont isolément utilisées est l'isothermalité qui a enregistré une contribution variant entre 36 % et 44 % selon le modèle.

Mis à part le RCP 4.5 (2055), la variable qui participe en deuxième position au calibrage de tous les modèles est la variable topographique « altitude » contribuant pour 26 % à 36 %.

Quant à la variable la moins contributive est la température minimale du mois le plus froid pour le modèle actuel et celui du scénario RCP 8.5 (2055). Concernant les modèles du RCP 4.5, c'est la température maximale du mois le plus chaud qui contribue le moins au calibrage des modèles.

CHAPITRE VI : Modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès

Enfin, la saisonnalité des précipitations ne contribue, quant à elle, que très peu (3,3 %) au modèle RCP 8.5 (2085), et constitue par conséquent la variable la moins contributive au modèle.

Tableau 31. Estimations des contributions relatives des variables environnementales aux modèles *MaxEnt*.

Abréviation	Dénomination de la variable	Permutation importance (%)				
		Climat actuel	Climat futur			
			RCP 4.5		RCP 8.5	
			2055	2085	2055	2085
Altitude	Altitude	31,6	12,8	22,8	31,7	26,3
Bio3	Isothermalité	43,9	35,2	36,5	37,2	36,1
Bio4	Saisonnalité de la température	5,4	4,7	3,2	4,7	7,6
Bio5	Température maximale du mois le plus chaud	1,7	3,3	1,1	7,8	12,8
Bio6	Température minimale du mois le plus froid	0,5	18,4	12	0,5	10,2
Bio12	Précipitations annuelles	15,8	17,6	18,2	13,2	3,6
Bio15	Saisonnalité des Précipitations	1,1	8,1	6,2	5	3,3

La distribution du pin d'Alep de la région des Aurès est principalement conditionnée par l'isothermalité, qui constitue en effet le facteur le plus déterminant de la distribution d'autres taxons du genre *Pinus* au nom des pins blancs mexicains modélisés par Aguirre-Gutierrez *et al.* (2015).

La présence du pin d'Alep dans les zones de valeurs d'isothermalité élevées indiquerait que l'espèce supporte mieux les différences de température quotidienne au cours du jour et de la nuit que celles annuelles.

Autrement exprimé ; c'est l'amplitude thermique annuelle qui conditionne la présence et la répartition spatiale du pin d'Alep de la région d'étude.

L'aire de répartition actuelle du pin d'Alep dans la région des Aurès est caractérisée par sa continentalité exprimée par l'écart thermique quotidien important.

L'altitude joue également un rôle fort important dans la distribution du pin d'Alep de la région des Aurès. Elle compte parmi les facteurs topographiques intervenants de façon déterminante dans la différenciation au sein d'un même mésoclimat, de microclimats particuliers (Lacoste et Salanon, 1999).

Élaboration des modèles

Un utilisant plus de 80 000 points de présence, deux types de distributions ont été considérés dans la modélisation du pin d'Alep de la région des Aurès. Il s'agit des distributions actuelle et future.

Les valeurs des probabilités logistiques utilisées pour définir les niveaux de convenance des zones favorable à la présence et à la croissance du pin d'Alep de la région des Aurès sont respectivement *Minimum training presence (MTP)* ; au-dessous duquel s'enregistre une absence totale de l'espèce et le *10 percentile training presence (PTP)* ; seuil d'adéquation au-dessus duquel 90 % de présence de l'espèce tombe. Les valeurs correspondant à chaque modèle élaboré sont inscrites dans le tableau 32.

Les résultats détaillés de la quantification de la distribution géographique actuelle et future du pin d'Alep de la région d'étude sont rapportés dans le tableau 33. Celui-ci montre que sous les conditions actuelles plus de 40 % du territoire de la région d'étude est non favorable à la présence du pin d'Alep, 36 % d'environ est très faiblement favorables à la présence du pin d'Alep, et que 20 % seulement du territoire est favorable à la présence du pin d'Alep.

CHAPITRE VI : Modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès

Le tableau 32 montre également que cette distribution serait changée aux futures selon les prévisions des scénarios *RCP 4.5* et *RCP 8.5*.

Tableau 32. Seuils logistiques des modèles de distribution de pin d'Alep de la région des Aurès.

	Seuil logistique du modèle de distribution				
	Actuelle	Future			
		RCP 4.5		RCP 8.5	
		2055	2085	2055	2085
<i>Minimum training presence (MTP)</i>	0.043	0.041	0.042	0.055	0.041
<i>10 percentile training presence (PTP)</i>	0.304	0.280	0.271	0.280	0.286

Tableau 33. Distribution spatiotemporelle du pin d'Alep de la région des Aurès.

Classes de distribution du pin d'Alep	Superficie (%)				
	Actuelle	Future			
		RCP 4.5		RCP 8.5	
		2055	2085	2055	2085
< valeurs du MTP	41,55	36,48	34,93	53,38	33,28
[MTP_PTP[	36,21	12,57	9,86	22,41	40,90
[PTP_0,4[	5,14	34,15	36,49	7,46	7,61
[0,4_0,5 [	5,66	5,85	6,17	6,65	6,01
[0,5_0,6 [	5,66	5,20	5,83	4,72	5,44
[0,6_0,7 [	4,88	4,39	5,51	3,66	5,28
[0,7_0,8 [	0,89	1,36	1,22	1,64	1,47
>0,8	0,01	0,01	0	0,08	0,01

CHAPITRE VI : Modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès

La dynamique prévue pour la distribution du pin d'Alep de la région d'étude à l'horizon de l'an 2055 et 2085 est présentée dans le Tableau 34.

Les résultats spatialisés de la distribution sont représentés par les figures 61, 62 et 63 qui sont élaborées sur la base d'une classification des valeurs attributaires des différents modèles, en fonction de la présence ou de la probabilité de présence de l'espèce. De ce fait, cinq (5) zones de convenance au pin d'Alep ont été obtenues pour la région d'étude ; zone non favorable, zone faiblement favorable ; zone moyennement favorable, zone fortement favorable.

Tableau 34. Dynamique spatiotemporelle des zones de présence potentielle de pin d'Alep.

Probabilité de présence de pin d'Alep	Qualité potentielle de l'espace	Tendance (%)				
		RCP 4.5		RCP 8.5		
		2055	2085	2055	2085	
0 %	Non favorable	-5,07	-6,62	+11,83	-8,27	
10 %	Très faiblement favorable	-23,64	-26,35	-13,8	+4,69	
> 10 %	[PTP_0,4[Faiblement favorable	+29,2	+31,86	+3,31	+2,82
] 0,4_0,7]	Moyennement favorable	-0,95	+0,8	-2,16	+0,18
	> 0,7	Hautement favorable	+0,47	+0,32	+0,82	+0,58
Dynamique		±30	±33	±16	±8	

Le signe (-) indique une perte de zone favorable et le signe (+) indique un gain.

Les cartes visibles à la figure (61, 62 et 63) exposent respectivement la spatialisation de la distribution actuelle du pin d'Alep de la région d'étude, ainsi que la réponse de cette distribution aux conditions climatiques futures, plus précisément vers l'an 2055 et 2085 sous les scénarios *RCP 4.5* et *RCP 8.5*.

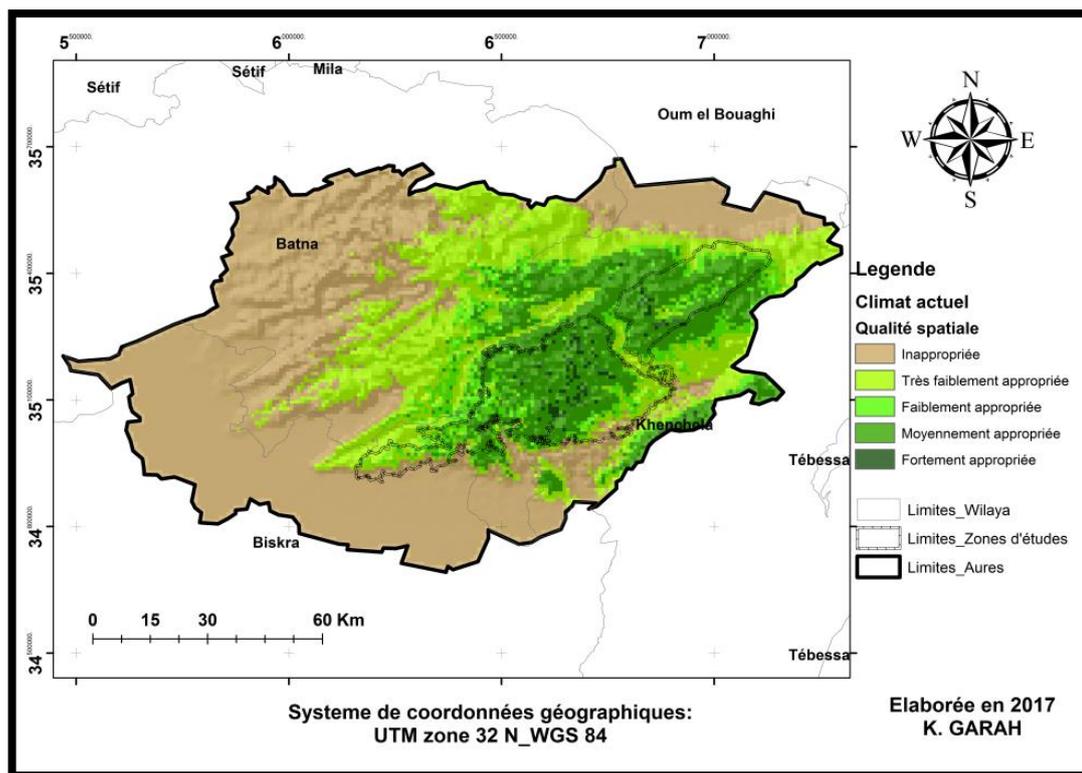


Figure 61. Carte de distribution géographique actuelle du pin d'Alep de la région des Aurès.

La projection de la distribution du pin d'Alep avec les deux scénarios (*RCP 4.5* et *RCP 8.5*) à l'horizon des deux années (2055 et 2085) donne une dynamique qui illustre la sensibilité du pin d'Alep de la région d'étude aux changements climatiques récents.

Quant à l'année 2055 ; le scénario *RCP 4.5* propose une dynamique de 30 % d'environ de la superficie globale de la région d'étude. Cette dynamique est caractérisée par une diminution des zones non favorable (-5,07 %) et très faiblement favorable (-23,64 %) ainsi que moyennement favorable (-0,95 %) au pin d'Alep, au profit des zones hautement favorables (+0,47 %) et surtout faiblement favorables (+29,2 %) au pin d'Alep.

D'autre part le scénario *RCP 8.5* propose une dynamique d'intensité moindre, estimée à la moitié de celle prévue par le scénario *RCP 4.5*. Dans les détails, il présente une augmentation des zones non favorable au pin d'Alep (+ 11,83 %) et d'une importance moindre les zone faiblement favorables (+ 3,31 %) et hautement favorables (+ 0,82 %) au détriment des zones très faiblement favorables (-13,8 %) et moyennement favorables (-2,16 %) au pin d'Alep.

D'une manière générale, à l'inverse du *RCP 4.5* qui prévoit une augmentation des zones favorables au pin d'Alep, le *RCP 8.5* propose une augmentation des zones non favorable au

pin d'Alep, ainsi qu'une augmentation plus marquée en matière de zones très favorables au pin d'Alep.

Quant à l'année 2085 ; le *RCP 4.5* prévoit une dynamique d'un taux de 33 % de la superficie globale de la zone d'étude. Cette dynamique est caractérisée par une diminution des zones non favorables (- 6,62 %) et très faiblement favorables (-26,35 %) au pin d'Alep au profit des zones faiblement favorables (+31,86 %), moyennement favorables (+0,8 %) et hautement favorables (+0,32 %) au pin d'Alep.

Par ailleurs, le scénario *RCP 8.5* propose une dynamique de 8 % d'environ, qui s'exprime par une diminution des zones non favorables (-8,27 %) au profit des zones très faiblement favorables (+ 4,69 %) faiblement favorables (+2,82 %), moyennement favorables (+0,18 %) et hautement favorables (+0,58 %) au pin d'Alep.

Enfin, les deux scénarios prévoient une augmentation des zones favorables au pin d'Alep à l'horizon de l'an 2085.

Sous les conditions actuelles, la moitié de la superficie totale de la région d'étude qui présente des zones favorables à la présence du pin d'Alep se localise exclusivement dans la partie orientale de la région des Aurès.

Les massifs de Ouled Yagoub et des Beni Imloul sont majoritairement classés comme espaces de pin d'Alep par excellence.

Vers l'année 2055, les deux scénarios prévoient une dynamique spatiale et temporelle des zones très favorables au pin d'Alep. La dynamique spatiale est surtout observée pour le massif des Beni Imloul, où s'aperçoit un déplacement de ces zones au Nord du massif, avec une multiplication de leur superficie. Une augmentation des zones très favorables au pin d'Alep s'observe également à l'Ouest du massif de Ouled Yagoub.

Quant aux zones qui sont actuellement moyennement favorables au pin d'Alep au Sud de la région d'étude, elles seront moins favorables vers l'an 2055 (*RCP 8.5*).

Les zones classées très faiblement favorables au Sud-Ouest des Aurès seront non favorables au pin d'Alep.

Les zones qui sont actuellement non favorables au pin d'Alep au Nord de la région d'étude seront favorables aux futures.

A l'horizon de l'an 2085 ; la région d'étude présente les mêmes dynamismes observés pour l'an 2055, avec une tendance à la prolifération Nordique marquante des zones favorables au pin d'Alep où le territoire serait plus en plus favorable à sa présence, et une modification au Sud de la qualité du territoire où les zones deviendraient plus en plus moins favorables au pin d'Alep.

L'observation de la dynamique prévue pour la région des Aurès montre une régression de la qualité du territoire au centre de Ouled Yagoub et plus marquante au Sud à Sud-Ouest des Beni Imloul.

D'une manière générale, le pin d'Alep présente une sensibilité contrastée dans la région d'étude. Les conditions seront moins favorables au Sud et plus favorables au Nord du massif, et que le Nord deviendrait plus en plus doux et le Sud plus en plus chaud. Dans ce contexte, ce résultat coïncide avec les constatations d'El Khorchani *et al.* (2007) ainsi que Vennetier *et al.* (2011) qui ont prévu que le réchauffement climatique actuel et futur aura un rôle positif sur la croissance du pin d'Alep dans les sites humides et négatif dans les sites secs.

D'autre part, le pin d'Alep réduirait sa répartition actuelle dans les zones de plus basses altitudes, et il occuperait par conséquent les sites de plus hautes altitudes. Ces constatations ont été prédites par Vennetier *et al.* (2005) et observé par Tirado et Hidalgo (2015) pour les espèces de pin situées sur la rive Sud de la Méditerranée.

La tendance dynamique des peuplements de pin d'Alep en Algérie est relativement similaire à celle des autres pays méditerranéens, alors que le potentiel de productivité est comparativement faible.

La distribution et la productivité de la forêt méditerranéenne de pins d'Alep évoluent de manière complexe tant dans l'espace que dans le temps en raison des changements climatiques, avec une expansion significative des zones potentielles de pins d'Alep ainsi que de fortes augmentations de la productivité (Médail et Quézel, 2003 ; Vennetier *et al.*, 2005 ; Rathgeber *et al.*, 2005). Subséquemment, et par le fait de sa plasticité écologique, le pin d'Alep occuperait des zones d'essences plus exigeantes dans les Aurès. En effet, dans des conditions spécifiques à haute altitude, on observe actuellement un mélange de cèdre de l'Atlas et de pin d'Alep vieilli, notamment dans la forêt de cèdres de l'Atlas de Taghda.

Bien que spatialement la dynamique prévue dans la région des Aurès soit identique pour les deux scénarios, et malgré que les conditions climatiques du *RCP 8.5* s'avèrent d'être serviable au pin d'Alep de la région d'étude, toutefois elles seront plus contrastées et plus intenses que celles du *RCP 4.5*.

Toutefois, il est à noter que les données et les programmes analytiques utilisés dans cette étude comporteraient des niveaux d'incertitude de degrés variables. Des incertitudes et des limites seraient liées, aux données climatiques et environnementales modélisées (Beaumont *et al.*, 2007), ainsi qu'aux résultats de prévision des modèles, d'autre part (Wiens *et al.*, 2007 ; Goberville *et al.*, 2015). En outre, des erreurs inconnues peuvent être associées au logiciel utilisé dans l'analyse. Par conséquent, les modèles obtenus doivent être interprétés comme étant des estimations et des approximations géographiques et non comme des certitudes.

CHAPITRE VI : Modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès

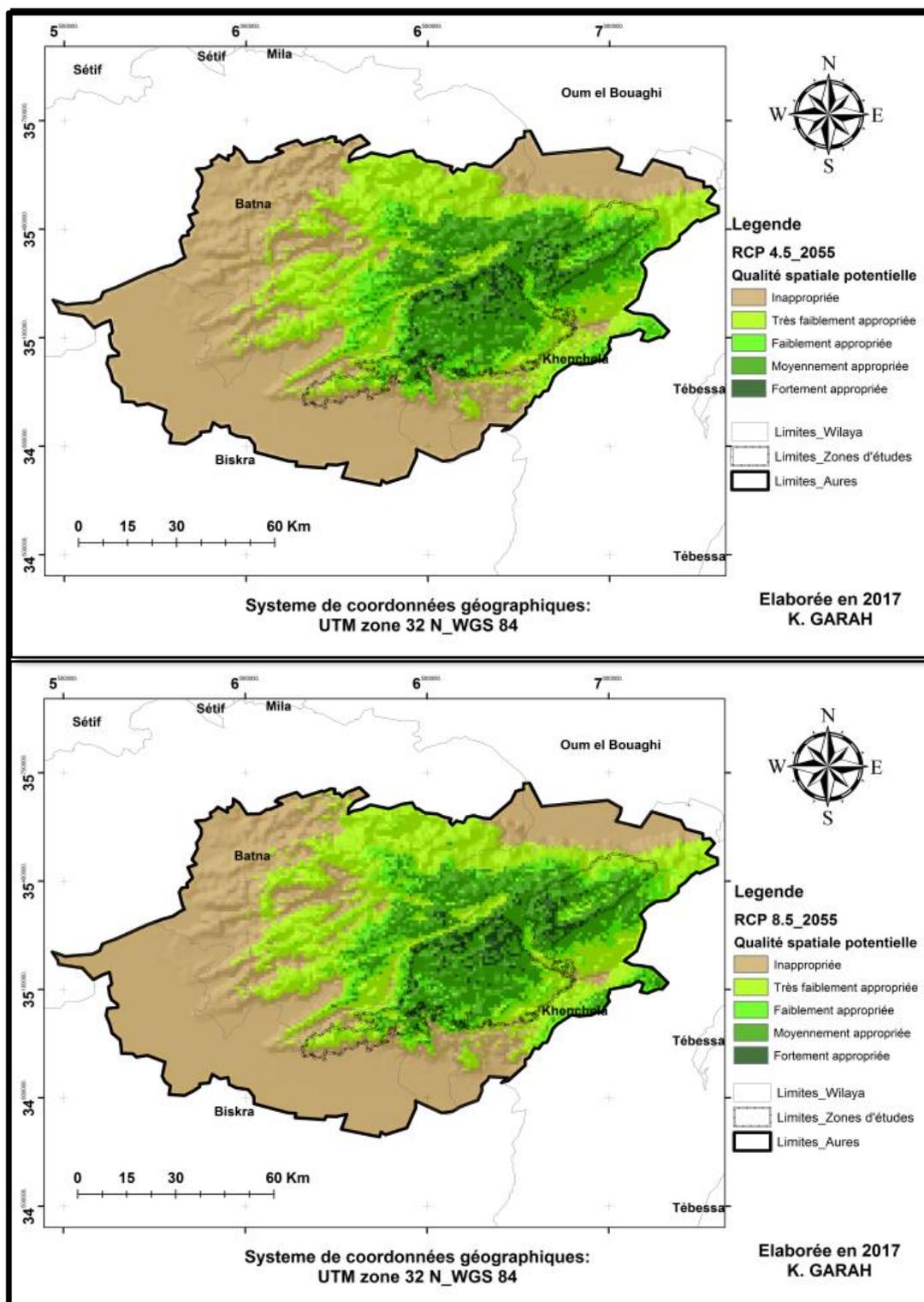


Figure 62. Cartes de sensibilité du pin d'Alep de la région des Aurès aux changements climatiques (horizon 2055).

CHAPITRE VI : Modélisation de la distribution potentielle actuelle et future du pin d'Alep dans la région des Aurès

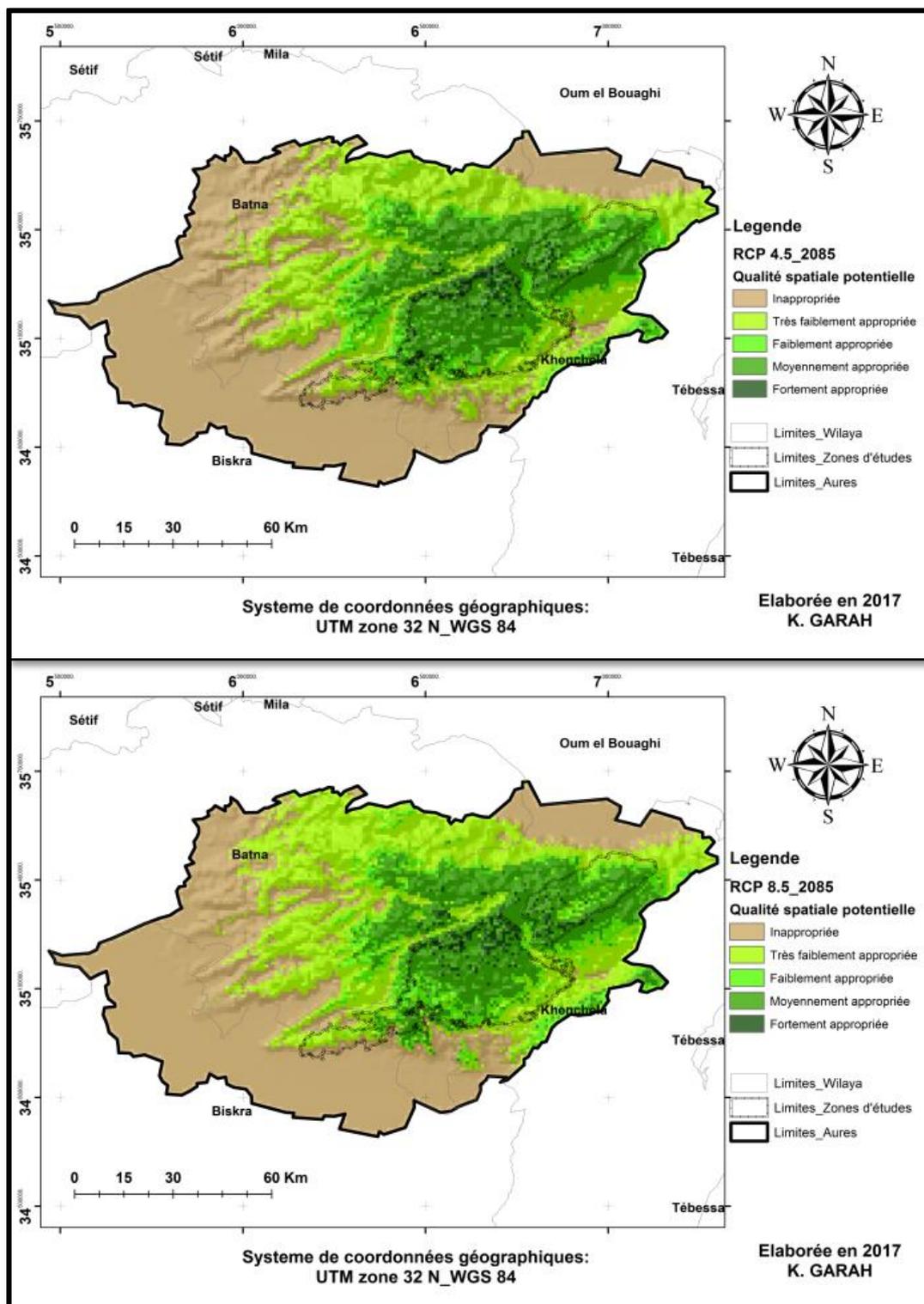


Figure 63. Cartes de sensibilité du pin d'Alep de la région des Aurès aux changements climatiques (horizon 2085).

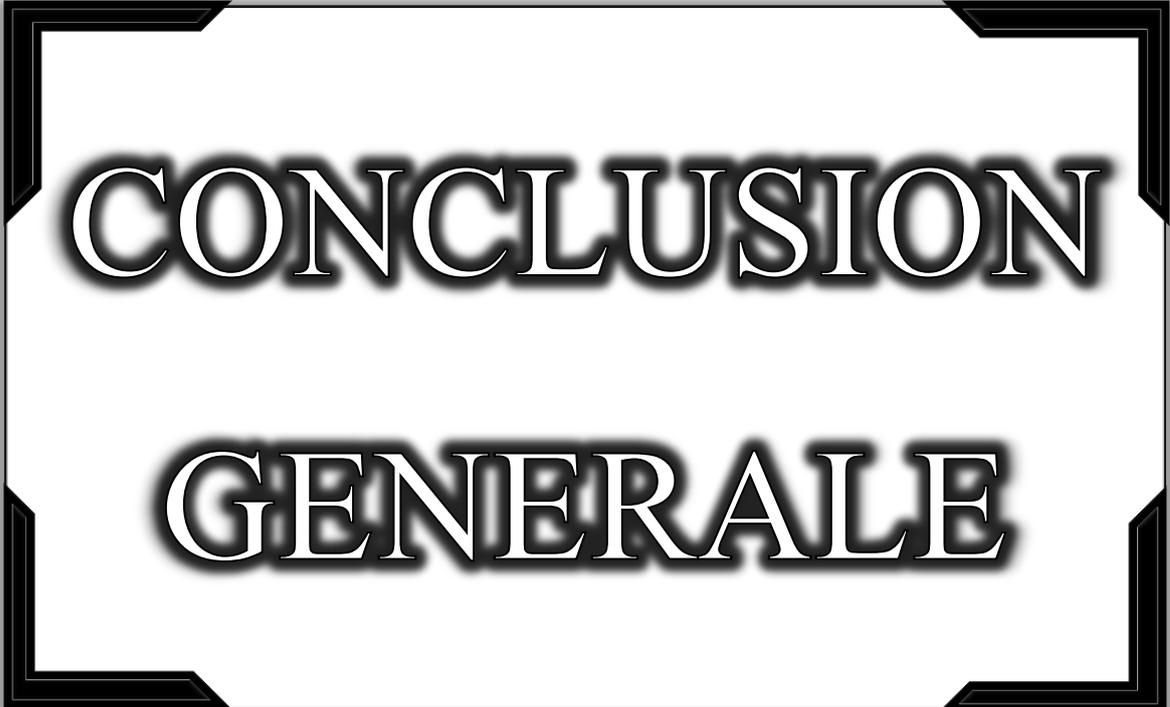
Conclusion

Cette étude présente une approche pour évaluer la vulnérabilité des forêts à pin d'Alep aux changements climatiques récents, par le fait que ces derniers constituent l'un des principaux facteurs contribuant à l'altération des structures globales en exerçant des changements dans la distribution spatiale des espèces.

Les conclusions de la présente étude prévoient une évolution plus ou moins progressive surtout au Nord de la région d'étude et une évolution régressive au Sud auraisien. Ainsi qu'une évolution régressive des pinèdes les plus importantes en Algérie ou plutôt un déplacement des aires favorables au pin d'Alep vers le Nord.

Il est à noter que les modèles élaborés pour le pin d'Alep de la région d'étude n'ont pris en considération que des facteurs climatiques et topographiques (altitudes). Alors qu'il existe également d'autres facteurs influençant la distribution des espèces telles que les interactions biotiques, l'adaptation génétique, les facteurs anthropiques, etc. Sachant que ce dernier facteur présente un élément décisif de la distribution du pin d'Alep de région d'étude et que tous ces facteurs auront amplifié les modifications et l'évolution prévues par ces modèles.

Les résultats obtenus constitueront un élément clé dans l'élaboration des plans de gestion et d'aménagement de la forêt auraisienne ainsi que des stratégies de conservation de l'espèce.



CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette thèse, il convient d'exposer une rétrospective des grandes lignes et des étapes marquantes de la recherche, de discuter sa validité et sa fiabilité, de montrer ses contributions et limites et de proposer quelques perspectives envisageables qui émergent de l'étude.

Rappelons que l'objectif global de cette thèse est d'exposer des pistes de réflexion sur la situation actuelle et future de la forêt naturelle du pin d'Alep des Aurès dans un contexte de changements globaux qui prévalent la région méditerranéenne.

De ce fait, le présent travail s'inscrit dans un axe de recherche terrain qui met en avant la tendance de la croissance des peuplements de pin d'Alep de la région des Aurès en rapport avec les facteurs environnementaux, plus particulièrement les conditions climatiques régnautes.

L'étude vise à analyser l'aspect quantitatif que spatial de la croissance du pin d'Alep étudié, en s'appuyant sur différentes approches scientifiques plus particulièrement, dendrométrie, dendrochronologique et géomatique.

Les différents aspects de l'étude ont permis de mettre en évidence les conclusions suivantes :

La région des Aurès est connue par une agressivité climatique et une topographie accidentée qui mettent en stress les écosystèmes forestiers aurasiens. Ces derniers sont caractérisés par une biodiversité exceptionnelle. La couverture végétale aurasienne qui présente un rideau contre l'avancée du désert est prédominée par le pin d'Alep et le chêne vert.

Les Aurès reposent principalement sur des substrats calcaires issus essentiellement de roches mères du crétacé inférieur. Le réseau hydrographique de la région d'étude est représenté par un chevelu hydrographique très développé.

Le climat de la région des Aurès est de type méditerranéen, caractérisé par une variabilité bioclimatique tridimensionnelle marquée et prédominée par le climat semi-aride. L'analyse des éléments climatiques témoigne la rigueur et la sévérité du climat général des Aurès.

L'analyse descriptive des caractéristiques dendrométriques a confirmé les potentialités productives déjà connues du pin d'Alep aurasiens. Pour un âge moyen de 50 ans, un accroissement radial moyen de 2.5 mm a été enregistré. Le diamètre moyen de 24 cm

d'environ, peut dépasser des valeurs maximales de 60 cm. La hauteur dominante varie de 5 à 18 m. Les performances productives sont également présentées par le volume moyen de bois sur pied qui avoisine 65 m³/ha à Beni Imloul.

L'analyse des variations interannuelles des épaisseurs de cernes a exposé une forte variabilité de la croissance radiale du Pin d'Alep étudié, avec une tendance générale à la diminution. Sur une période de 62 ans allant de 1953 jusqu'à 2014, ont été détectées 27 années caractéristiques. Parmi lesquelles 4 années de croissances exceptionnelles positives (1958, 1962, 1975 et 1988) et 2 négatives (2000 et 2012) ont été repérées chez tous les individus analysés.

Les résultats obtenus ont montré une corrélation positive forte entre la croissance radiale du Pin d'Alep analysé et les cumules pluviométrique annuelles régionales de l'année en cours, avec une sensibilité marquée à l'égard des précipitations des mois de (février, avril, mai et juillet).

L'analyse géomatique par méthode de classification supervisée des images satellitaires et leur comparaison diachronique a permis la caractérisation de la dynamique spatiotemporelle de l'occupation du sol entre 1987 et 2014 de la zone forestière située dans l'Aurès oriental. Les résultats ont révélé une évolution régressive de la forêt aurásienne au cours des 27 dernières années. Cette régression de la couverture végétale est localisée essentiellement au niveau des peuplements de Pin d'Alep qui prédominent dans la région d'étude. La dégradation actuelle serait liée aux changements climatiques récents et amplifiée par l'action anthropique.

La télédétection satellitaire a été également adoptée à travers le calcul d'indices spectraux et la cartographie de leurs changements. Les indices en question sont NDVI, GNDVI et SR qui permettent l'identification de la végétation verte et mesure de son état sanitaire, le NDWI qui présente une mesure d'état hydrique, ainsi que BAI et NBR qui détectent le changement de l'activité photosynthétique de la végétation suite au passage du feu. L'analyse descriptive des valeurs interannuelles des indices spectraux calculés pour la zone d'étude a confirmé les résultats obtenus par l'approche dendrochronologique qui considère 2003 comme année très avantageuse à la croissance ligneuse, et 2000 comme année caractéristique négative à croissance la plus faible de toute la série expérimentée. L'étude a également permis de localiser et d'explicitier les zones qui ont subi une dégradation dans le couvert végétal précédemment mentionné par les résultats de l'étude diachronique.

Enfin, une modélisation de la distribution spatiale du pin d'Alep dans la région des Aurès a été effectuée par la méthode *MaxEnt*, en déterminant les facteurs environnementaux essentiels qui participent à sa structuration géographique actuelle, et en considérant sa répartition spatiale future, sous l'influence des scénarios du changement climatique récent prévus pour la région d'étude. Les résultats ont montré que l'amplitude thermique annuelle suivie par l'altitude sont les principaux facteurs de la distribution spatiotemporelle du pin d'Alep dans la région d'étude.

Sous les conditions actuelles que 20 % du territoire semble favorable à la présence du pin d'Alep. Tandis qu'au future, les changements climatiques résulteraient une extension des aires « moyennement favorable » au pin d'Alep, avec un déplacement géographique de celles-ci vers les latitudes nord, ainsi que vers les altitudes plus hautes.

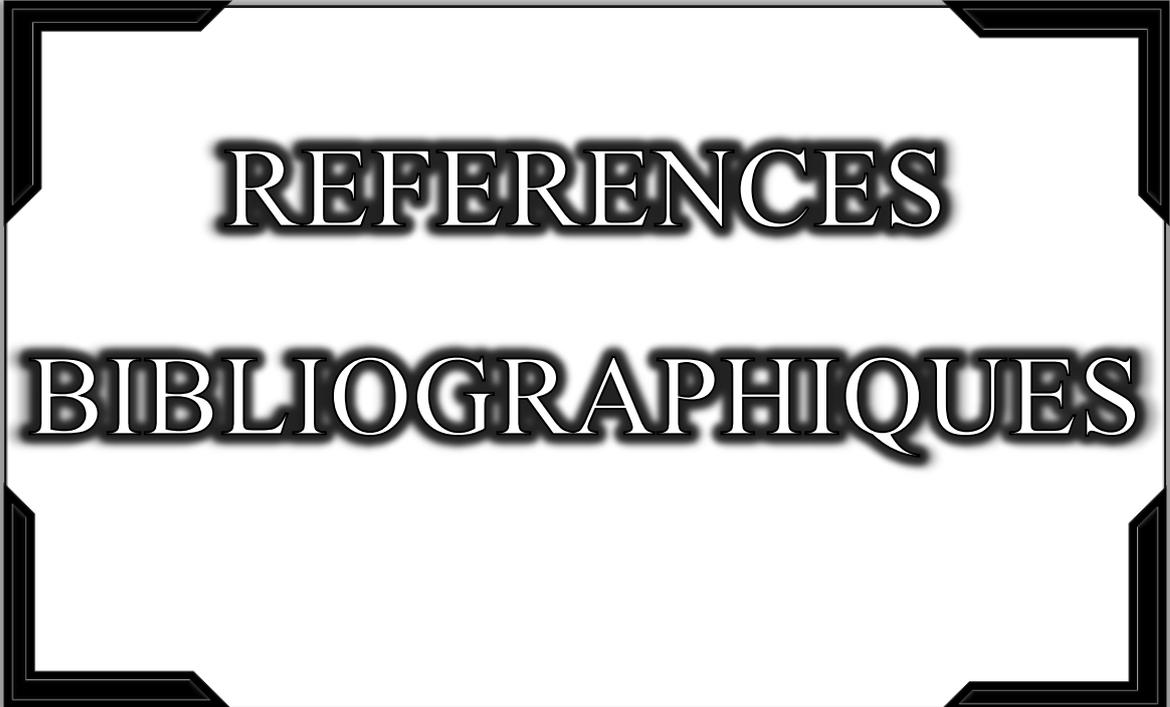
Il est intéressant de signaler qu'à la lumière des résultats obtenus, les approches méthodologiques adaptées nous semblent complémentaires et très satisfaisantes.

Les résultats de cette recherche constituent un diagnostic descriptif et analytique utile pour comprendre la réponse du Pin d'Alep aux changements climatiques récents, afin d'aider les acteurs de la gestion des ressources naturelles à la planification dans le cadre de développement durable, pour une meilleure protection du patrimoine forestier national.

Toutefois, il est à signaler que l'étude a été limitée par la qualité des données météorologiques qui sont généralement recueillies auprès des stations à ambiances non forestières et fournissant des séries le plus souvent courtes et/ou lacunaires. Le manque d'un matériel adéquat de dendrochronologie, et de données de télédétection à haute résolution, ainsi que l'inaccessibilité de certains sites de la région d'étude présentent un handicap qui influence sur la qualité des résultats obtenus.

En perspective, nous préconisons l'application d'une sylviculture adaptée à chaque peuplement de pin d'Alep dans la région d'étude, afin de favoriser la régénération et d'assurer la pérennité de la forêt. Surtout que les actions sylvicoles pratiquées autrefois au nord des Aurès ont montré leur efficacité.

D'autre part, il serait judicieux d'éviter l'utilisation du pin d'Alep dans les plantations au niveau des zones classées non favorables à l'essence, plus particulièrement au sud de la région des Aurès. Il faut par contre sélectionner des espèces qui s'adaptent le mieux aux changements climatiques.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1]Abdessemed K. (1981). Le cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Etude phytosociologique et les problèmes de la conservation d'aménagement. *Thèse de Doctorat, Université d'Aix en provence Marseille III-France* : 199 p.
- [2]Abdessemed K. (1984). Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie), première partie : la dégradation et ses origines et ses conséquences. *Forêt Méditerranéenne*, 6 (1) : 19-26.
- [3]Abdessemed K. (1985). Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie), deuxième partie : les mesures à prendre. *Forêt Méditerranéenne*, 7 (1) : 43-52.
- [4]Acot P. (2008). L'histoire du climat : de la découverte de l'effet de serre au réchauffement actuel. *Forêt Méditerranéenne*, 30 (2) : 113-118.
- [5]Aguirre-Gutiérrez J., Serna-Chavez H. M., Villalobos-Arámbula A. R., Pérez de la Rosa J. A., Raes N. (2015). Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely related Mexican white pines. *Diversity and Distributions*, 21 : 245-257.
- [6]Alexandrian D., Rigolot E. (1992). Sensibilité du pin d'Alep à l'incendie. *Forêt méditerranéenne*, 13 (3) :185-198.
- [7]Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M *et al.*, (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259: 660-684.
- [8]ASAL (2013). *Rencontre ASAL-DGF sur la présentation du bilan préliminaire des feux de forêts 2012*. <http://www.asal.dz/>
- [9]Attolini M.R., Calvani F., Galli M., Nanni T., Ruggiero L., Schaer E., Zuanni F. (1990). The relationship between climatic variables and wood structure in *Pinus halepensis* Mill.. *Theoretical and Applied Climatology*, 41 : 121-127.

- [10] B.E. et Ballais J.-L. (1989). « Aurès », *encyclopédie berbère*, 7 : 1066-1095.
- [11] B.E., Leveau Ph., Morizot P., Morizot J., Chamla M.-C., Demoulin F., Adjali S. et Chaker S. (1990). « Aurès », *encyclopédie berbère*, (8) : 1097-1169.
- [12] Bannari A., D. Morin, F. Bonn et Huete A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1): 95–120.
- [13] Barredo J. I., Strona G., De Rigo D., Caudullo G., Stancanelli G., San-Miguel-Ayanz J. (2015). Assessing the potential distribution of insect pests: case studies on large pine weevil (*Hylobius abietis* L) and horse-chestnut leaf miner (*Cameraria ohridella*) under present and future climate conditions in European forests. *EPPO Bulletin*, 45 (2) : 273-281.
- [14] Beaumont L. J., Pitman A. J., Poulsen M., Hughes L. (2007). Where will species go? Incorporating new advances in climate modelling into projections of species distributions. *Global Change Biology*, 13 : 1368–1385.
- [15] Beghami Y., Kalla M., Thinon M., Benmessaoud H. (2012). Spatiotemporal Dynamics of Forest and Mountain Formations in Aurès Area, Algeria. *Journal of Life Sciences*, 6 : 663-669.
- [16] Benmessaoud H., Kalla M., Driddi H. (2009). Évolution de l'occupation des sols et désertification dans le sud des Aurès (Algérie). *M@ppemonde*, 94 (6) : 1-11.
- [17] Bensaid S. (1995) : Bilan critique du barrage vert en Algérie. *Sécheresse*, 6 (3) : 247-255.
- [18] Bentouati A. (2008). La situation du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Forêt méditerranéenne*, 29 (2) : 203-208.
- [19] Bentouati A., Bariteau M. (2006). Réflexion sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Forêt méditerranéenne*, 27 (4) : 317-322.
- [20] Berkane A., Yahiaou A. (2007). L'érosion dans les Aurès. *Sécheresse*, 18(3) : 213-216.

- [21] Biondi F., Waikul K. (2004). DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & geosciences*, 30 (3) : 303-311.
- [22] Blayac J. (1899). Le pays des Nememchas à l'est des monts Aurès. *Annales de Géographie*. 8 (38) : 141-159.
- [23] Blondel J. (2008). Humans and wildlife in Mediterranean islands. *Journal of Biogeography*, 35 : 509-518.
- [24] BNEDER (Bureau National D'études Pour Le Développement Rural) (2010). Etude et expertise sur le dépérissement de la cédraie d'Ouled Yagoub et Chelia — Wilaya de Khenchela, phase II : identification et localisation des foyers de dépérissement, octobre 2010.
- [25] Boudy P. (1952). *Guide du forestier en Afrique du nord*. La maison rustique, Paris : 505 p.
- [26] Bouzekri A. et Benmessaoud H. (2014). *Study and diachronic analysis of changes of ground occupation area of oriental Aures Algeria*. *Analele Universității Din Oradea, Seria Geografie*, 24 (2) : 180-189.
- [27] Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63: 625-644.
- [28] Busson H. (1900). Les vallées de l'Aurès. *Annales de Géographie*. 9 (43): 43-55.
- [29] Campbell J.B. (1987). *Introduction to remote sensing*. The Guilford Press: New York: 281 p.
- [30] Chafai C. (2016). *Contribution à l'étude de la dynamique spatiale et de la biomasse du frêne dimorphe dans la cédraie d'Ouled Yagoub W. de Khenchela*. mémoire de Magister en sciences agronomiques. Université de Batna 1 – Algérie : 108 p.
- [31] Chapin F.S. III, Walker B.H., Hobbs R.J., Hooper D.U., Lawton J.H., Sala O.E. *et al.* (1997). Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science*, 277: 500–504.

- [32] Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M., Amanatidis G. (2007). Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climate Change*, 81 : 1-6
- [33] Chuvieco E., Martín M. P., Palacios A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination, *International journal of remote sensing*, 23: 5103–5110.
- [34] Clark D. A. et Clark D. B. (1999). Assessing the growth of tropical rain forest trees: Issues for forest modeling and management. *Ecological applications*, 9: 981–997.
- [35] Cook Ed. R. (1985). A time series analysis approach to tree-ring standardization. *Thèse de doctorat, University of Arizona, Tucson* : 171 p.
- [36] Daoui A., Douz J. Marchal R. Zerizer A. (2007). Valorisation du bois de pin d'Alep par déroulage : optimisation de son étuvage. *Bois et Forêts Des Tropiques*, 294 (4): 51-64.
- [37] De lartigue M. (1904). "*Monographie de l'Aurès*". Imprimerie à vapeur Marle - Audrino, Constantine : 491 p.
- [38] De Luis M., González-Hidalgo J.C., Longares L.A., Stepanek P. (2009). Seasonal precipitation trends in the Mediterranean Iberian Peninsula in second half of 20th century. *International Journal of Climatology*, 29: 1312–1323.
- [39] De Souza H. J., Delabie J. H. C. (2013). Modélisation de la distribution géographique de la fourmi *Basiceros scambognathus* (Brown, 1949) dans la région Néotropicale (*Hymenoptera, Formicidae, Myrmicinae*). *Bulletin de la Société entomologique de France*, 118 (1) : 7-13.
- [40] Demarteau M., Francois L., Cheddadi R., et Roche E. (2007). Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. *Geo-Eco-Trop*, 31 : 105 – 146
- [41] El Khorchani A. (2006). Approche dendrochronologique de l'influence des changements climatiques sur la productivité des forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. . *Thèse de Doctorat, Université d'Aix en provence Marseille III-France*: 211 p.

- [42]El Khorchani A., Gadbin-Henry C., Bouzid S., Khaldi A. (2007). The impact of drought on the growth of three forest species in Tunisia (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinea* L. et *Pinus pinaster* Sol.). *Sécheresse*, (18) 2 : 113-121.
- [43]El Khorchani A., Khaldi A., Nasr Z. (2013). Evolution des relations croissance-climat de trois espèces de pin en Kroumirie (Nord-Ouest de la Tunisie). *Sécheresse*, 24 : 138–146.
- [44]Elith J., Leathwick J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 40 : 677–697.
- [45]Elith J., Phillips S. J., Hastie T., Dudi'k M., Chee, Y. E., Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17 : 43–57.
- [46]FAO (2013). *Etat des forêts méditerranéennes 2013*. <http://www.fao.org/docrep/017/i32226f/i32226f.pdf>
- [47]Flory A.R., Kumar S., Stohlgren T.J., Cryan P.M. (2012). Environmental conditions associated with bat white nose syndrome mortality in the north-eastern United States. *Ecological applications*, 49 : 680–689.
- [48]Fuller D.O., Ahumada M.L., Quinones M.L., Herrera S., Beier J.C. (2012). Nearpresent and future distribution of *Anopheles albimanus* in Mesoamerica and the Caribbean Basin modeled with climate and topographic data. *International Journal of Health Geographics*, 11 : 13 p.
- [49]Gao B.C. (1996). NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58 : 257-266.
- [50]Garah K. (2013). Étude de l'accroissement radial d'un reboisement de pin d'Alep par l'approche dendroécologique. (Cas du reboisement de Berriche - Ain-touta). *Mémoire de master. Université de Batna* : 86 p.

- [51] Garah K., Chafai Ch., Bentouati A. (2016). Évolution spatiotemporelle des écosystèmes forestiers à Pin d'Alep de l'Aurès oriental (Algérie). *Revue Forestière Française*, 3 : 217-229.
- [52] Garcia K., Lasco R., Ines A., Lyon B., Pulhin F. (2013). Predicting geographic distribution and habitat suitability due to climate change of selected threatened forest tree species in the Philippines. *Applied Geography*, 44 : 12-22.
- [53] Gbesso F.H.G., Tente B.H.A., Gouwakinnou GN., Sinsin B.A. (2013). Influence des changements climatiques sur la distribution géographique de *Chrysophyllum albidum* G. Don (Sapotaceae) au Bénin. *International Journal of Biological Chemistry*, 7 (5) : 2007-2018.
- [54] GIEC (2014). IPCC AR5 WGII, 2014. Fifth Assessment Report – Impacts, Adaptation and Vulnerability. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> .
- [55] Girard F., Vennetier M., Guibal F., Corona C., Ouarmim S., Herrero A. (2011). *Pinus halepensis* Mill. crown development and fruiting declined with repeated drought in Mediterranean France. *European Journal of Forest Research*, 131: 919-931.
- [56] Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Merzlyak M.N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58 : 289–298.
- [57] Gitelson A.A., Merzlyak M.N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 22 : 689–692.
- [58] Gnagbo A., Kpangui K. B., Adou Yao C. Y. (2015). Distribution des épiphytes de Côte d'Ivoire : effets des zones phytogéographiques et des variations pluviométriques. *Afrique Science*, 11 (1) : 175 – 186.
- [59] Goberville E., Beaugrand G., Hautekèete N. C., Piquot Y., Luczak C. (2015). Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models. *Ecology and evolution*, 5 (5) : 1100-16.

- [60] Guiot J., Guibal F., Huc R., Misson L., Rambal S., Ratte J.P, Vennetier M., (2007) : Réponse des forêts Méditerranéennes françaises aux changements climatiques. *Programme APR GICC 2003, Rapport scientifique* : 47 p.
- [61] Guisan A. et Thuiller W. (2005). Predicting Species Distribution Offering More than Simple Habitat Models. *Ecology Letters*, 8 : 993-1009.
- [62] Guisan A. et Zimmermann N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135 : 147–186.
- [63] Halimi A. (1980). *L'Atlas Blidéen, climat et étages végétaux OPU*. Alger : 523 p.
- [64] Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. (2004). The WorldClim interpolated global terrestrial climate surfaces, version 1.3. Available on: <http://www.worldclim.org>
- [65] Holms R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 43 : 69-78.
- [66] Huete, A.R. (1988). A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 : 295-309.
- [67] Hughes L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?: *Trends in Ecology & Evolution*, 15 (2) : 56-61.
- [68] Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50 : 663-666.
- [69] Kadik B. (1987). *Contribution à l'étude du pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Algérie : Ecologie dendrométrie morphologie*. OPU. Alger, 1987 : 580 p.
- [70] Keller T., Edouard J.-L., Guibal F., Guiot J., Tessier L., Vila B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences III*, 323 : 913-924.
- [71] Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez E., Briki A., Hamchi A. (2013). La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Sécheresse*, 24 (2): 129-37.

- [72] Kherchouche D., Bentouati A., Kaabeche D. (2011). Croissance et écologie du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif des Beni-Imloul (Aurès, Algérie). *Sécheresse*, 22 (1) : 43-48.
- [73] Lacoste A. et Salanon R. (1999). *Eléments de biogéographie et d'écologie*. 2e édition Broché : 318 p.
- [74] Laffite R. (1939). Étude géologique de L'Aurès (Algérie). *Thèse de Doctorat. Université de Paris* : 484 pp + Figures.
- [75] Lebourgeois F., Merian P. (2012). Principes et méthodes de la dendrochronologie. *LERFOB, AgroPariTech, Centre de Nancy* : 85 p.
- [76] Lebourgeois F., Pierrat J.-C., Perez V., Piedallu C., Cecchini S., Ulrich E. (2010). Simulating phenological shifts in French temperate forests under two climatic change scenarios and four driving GCMs. *International Journal of Biometeorology*, 54 (5) : 563-581.
- [77] Linares JC, Taïqui L, Camarero JL, (2011). Increasing Drought Sensitivity and Decline of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas Forests. *Forests*, 2 (3): 777-796.
- [78] López-García, M.J. et Caselles V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 1: 31-37.
- [79] López-Tirado J. et Hidalgo P. J. (2015). Ecological niche modelling of three Mediterranean pine species in the south of Spain: a tool for afforestation/reforestation programs in the twenty-first century. *New Forests*, 47 : 411- 429.
- [80] Martonne E. (1926). Aréisme et indice d'aridité. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 181 : 1395-1398.
- [81] Mas J.F. (2000). Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Journal Canadien de télédétection*, 26 (4) : 349-362.
- [82] Mbatudde M., Mwanjololo M., Kakudidi E. K., Dalitz H. (2012). Modelling the potential distribution of endangered *Prunus africana* (Hook. f.) Kalkm. in East Africa. *African Journal of Ecology*, 50 : 393-403.

- [83]McVicar T. R. et Bierwirth P. N. (2001). Rapidly assessing the 1997 drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery. *International journal of remote sensing*, 22 : 2109 –2128.
- [84]Medail F. et Quezel P. (2003). Conséquences écologiques possibles des changements climatiques sur la flore et la végétation du bassin méditerranéen. *Bocconea*, 16 (1) : 397-422.
- [85]Meddour-Sahar O. et Derridj A. (2012). Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatio-temporelle et cartographie du risque (période 1985-2010). *Sécheresse*, 23 (2) : 133-141.
- [86]Merian P. (2012). Notice d'utilisation de l'application POINTER. POINTER V4.0 – *Notice d'utilisation* : 6 p.
- [87]Mezali M. (2003). Rapport sur le secteur forestier en Algérie. 3^{ème} session du forum des Nations Unis sur les forêts : 8 p.
- [88]Mitard A.E. (1941). Aperçu des grands traits géographiques de l'Aurès, Algérie. *Revue de géographie alpine*, 29 (4) : 557-578.
- [89]Mokhtari N., Mrabet R., Lebailly P., et Bock L. (2013). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 2 (1) : 50-66.
- [90]Nahal I. (1962). Le pin d'Alep. Etude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts*, 19 (4) : 533-627.
- [91]Nahal I. (1986). Taxonomie et aire géographique des pins du groupe *halepensis*. Options méditerranéennes. *Série d'étude CIHEAM* 86 (1) : 1-9.
- [92]Nicault A., Rathgeber C., Tessier L., Thomas A. (2001). – Observations sur la mise en place du cerne chez le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) : confrontation entre les mesures de croissance radiale, de densité et les facteurs climatiques. *Annals of Forest Science*, 58 : 769-784.
- [93]NOAA (2013). Willett K. M., Dolman A. J., Hall B. D., Thorne P. W. : Eds., [Global climate] : Overview , Temperature, Hydrological cycle [in "State of the

Climate 2012”]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (8), 7-11, 11-14, 18-24.

- [94] Nouaceur Z., Laignel B. et Turki I. (2013). Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ?. *Physio-géo*, 7 : 307-323
- [95] Olivar J, Bogino S, Spiecker H, Bravo F (2015). Changes in climate-growth relationships and IADF formation over time of pine species (*Pinus halepensis*, *P. pinaster* and *P. sylvestris*) in Mediterranean environments. *Forest Systems*, 24 (1), e-010 : 9 p.
- [96] Olivar J., Bogino S., Spiecker H., Bravo F. (2012). Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes. *Dendrochronologia*, 30 : 35 - 47.
- [97] ONTF « Office Nationale des Travaux Forestiers » (1977). *Inventaire forestier de la forêt de Beni Imloul dans le massif des Aurès – Algérie*. Rapport de la Direction du grand projet Aurès Batna. Projet de mise en valeur Agro-sylvo-industriel des Aures, G.T.Z n° 114.
- [98] Papadopoulos A., Serre-Bachet F., Tessier L. (2001). Tree ring to climate relationships of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *Ecologia mediterranea*, 27 (1) : 89-98.
- [99] Papadopoulos A., Tolika K., Pantera A., Maheras P. (2009). Investigation of the annual variability of the Aleppo pine tree-rings width: the relationships with the climatic conditions in the Attica basin. *Global Nest Journal*, 11 (4) : 583-592.
- [100] Pardé J. (1957). La productivité des forêts de pin d'Alep en France. *Annales E.N.E.F de la Station de Recherches et Expériences forestières*, 15 (2) : 367-414.
- [101] Parmesan C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37: 637–669
- [102] Parmesan C. and Yohe G. (2003). A Globally Coherent Fingerprint of Climate Change Impacts across Natural Systems. *Nature*, 421 : 37-42.

- [103] Pearson R. G., Thuiller W., Araujo M. B., Martinez-Meyer E., Brotons L., McClean C., Miles L., Segurado P., Dawson T. P., Lees D. C. (2006). Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, 33 : 1704–1711.
- [104] Peck M., Thorn J., Mariscal A., Baird A., Tirira D., Kniveton D. (2011). Focusing conservation efforts for the Critically Endangered brown-headed spider monkey (*Ateles fusciceps*) using remote sensing, modeling, and playback survey methods. *International Journal of Primatology*, 32 (1) : 134 - 148.
- [105] Phillips S. J. (2010). A brief tutorial on Maxent. *Lessons in Conservation*, 3: 107–135.
- [106] Phillips S. J., Anderson R. P., Schapire R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190 : 231–259.
- [107] Phillips S. J., Dudik M. (2008). Modeling of Species Distributions with MaxEnt New Extensions and a Comprehensive Evaluation. *Ecography*, 31 : 161-175.
- [108] Phillips S. J., Dudik M., Schapire R. E. (2004). A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning, Banff, 4-8 July 2004 : 655-662.
- [109] Platts P. J., Omeny P. A., Marchant R. (2015). AFRICLIM: high-resolution climate projections for ecological applications in Africa. *African Journal of Ecology*, 5 : 103-108.
- [110] Pouget M. (1980). Les relations sol-végétation dans les steppes sud-algéroises. Trav. Doc. O.R.S. T .O.M., n° 116, Paris : 555 p.
- [111] Quezel P. (1986). Les pins du groupe “*Halepensis*” Ecologie, Végétation, Ecophysiologie. *Série d'étude CIHEAM*, 86 (1) : 11-23.
- [112] Quézel P. et Médail F. (2003). Conséquences écologiques possibles des changements climatiques sur la flore et la végétation du bassin méditerranéen. *Boccone*, 16 (1) : 397-422.
- [113] Rambal S., Hoff C. (1998). Mediterranean ecosystems and fire: the threats of global change. In ‘Large Forest Fires’. (Ed. JM Moreno) : 187–213.

- [114] Rathgeber C. (2002). — Impact des changements climatiques et de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique sur la productivité des écosystèmes forestiers : exemple du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire (France). — IMEP. . *Thèse de Doctorat, Université d'Aix en provence Marseille III-France* : 312 p.
- [115] Rathgeber C., Nicault A. et Guiot J. (2005). Évolution de la croissance radiale du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Provence calcaire (Sud-est de la France), *Ecologia Mediterranea*, 31 (1) : 75-82.
- [116] Reiss, H., Cunze, S., König, K., Neumann, H., Kröncke, I. (2011). Species distribution modelling of marine benthos: a North Sea case study. *Marine Ecology Progress Series*, 442 : 71–86.
- [117] Remya K., Ramachandran A., Jayakumar S. (2015). Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. Using MAXENT model in the Eastern Ghats, India. *Ecological Engineering*, 82 : 184-188.
- [118] Rigolot E. (2008). Impact du changement climatique sur les feux de forêt. *Forêt méditerranéenne*, 29 (2) : 167-176.
- [119] Rondeux, J. (1993). *Les Mesures des Arbres et Des Peuplements Forestiers*. Presses Agronomiques de Gembloux, Gembloux : 521 p.
- [120] Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J. A. (1973). DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, Proceedings... NASA SP-351 I* : 309-317.
- [121] Rupprecht F., Oldeland J., Finch M. (2011). Modelling potential distribution of the threatened tree species *Juniperus oxycedrus*: how to evaluate the predictions of different modelling approaches?. *Journal of Vegetation Science*, 22 (4) : 647 – 659.
- [122] Safar, W. (1994).— Contribution à l'étude dendroécologique du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans une zone semiaride d'Algérie : l'Atlas saharien (Ouled Naïl – Aurès – Hodna). . *Thèse de Doctorat, Université d'Aix en provence Marseille III-France* : 215 p.

- [123] Sánchez-Salguero, R., Navarro-Cerillo, R. M., Camarero, J. J., and Fernández-Cancio, A. (2012). Selective drought-induced decline of pine species in southeastern Spain. *Climate Change*, 113 : 767–785.
- [124] Sánchez-Salguero, R., Navarro-Cerillo, R.M., Camarero, J.J., Fernández-Cancio, A., (2010). Drought-induced growth decline of Aleppo and maritime pine forests in southeastern Spain. *Forest Systems*, 19 : 458–469.
- [125] Sarmoum M., Guibal F., Abdoun F. (2016). Effet des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'Alep au climat dans le massif de l'Ouarsenis, Algérie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 329 (3) : 17-27.
- [126] Seltzer P. (1946). *Le climat de l'Algérie*. Institut de météorologie du globe de l'Algérie : 219 p.
- [127] Serre-Bachet, F. (1992). Les enseignements écologiques de la variation de l'épaisseur du cerne chez le Pin d'Alep. *Forêt méditerranéenne*, 8: 171-176
- [128] Terink W. , Immerzeel W.W., Droogers P. (2013). Climate change projections of precipitation and reference evapotranspiration for the Middle East and Northern Africa until 2050. *International Journal of Climatology*, 33 : 3055-3072
- [129] Thomas B., Lutz S., Rideau C. (2015). *Modélisation de la répartition des campagnols aquatiques du genre Arvicola en Normandie*. Groupe Mammalogique Normand, Agence de l'Eau Seine-Normandie : 62 p. + annexes.
- [130] Thuiller W., Albert C., Araújo M.B., Berry P.M., Cabeza M., Guisan A., Hickler T., Midgley G.F., Paterson J., Schurr F.M., Sykes M.T. et Zimmermann N.E. (2008). Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 9 : 137– 152.
- [131] Tucker C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127–150.
- [132] Vennetier M. (2012). Changement climatique et dépérissements forestiers : causes et conséquences. *Changement climatique et modification forestière*, Paris, CNRS : 50-60.

- [133] Vennetier M., Ripert C., Brochiéro F., Rathgeber C. B. K., Chandioux O., Estève R. (2010). Évaluation de la productivité du Pin d'Alep en région méditerranéenne française. *Revue Forestière Française*, (5) : 503-524.
- [134] Vennetier M., Vila B., Liang E. Y., Guibal F., Ripert C., Chandioux O. (2005). Impact du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française. *Ingénieries* (44): 49 – 61.
- [135] Wiens J. A., Stralberg d., Jongsomjit d., Howell C. A., Snyder M. A. (2009). Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106 : 19729–19736.
- [136] Yang X.Q., Kushwaha S.P.S., Saran S., Xu J., Roy P.S. (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 51 : 83-87.



RESUME

RÉSUMÉ

Dans un contexte de changements climatiques récents, le présent travail vise à révéler, évaluer et expliquer les conséquences des fluctuations des variables climatiques sur les écosystèmes forestiers (à pin d'Alep) situés dans la région des Aurès située au nord-est de l'Algérie, une attention particulière est accordée au pin d'Alep par le fait qu'il présente l'essence forestière majeure du pays.

Différentes approches scientifiques sont utilisées à cet effet pour analyser l'état passé et actuel des formations végétales à travers leurs caractéristiques dendrologiques et spectrales, d'expliquer leur dynamique spatiotemporelle à travers les changements dans l'occupation du sol, ainsi que la modélisation de la distribution spatiale potentielle actuelle et future des pinèdes (Foresterie, écologie, dendrométrie, dendrochronologie, climatologie, télédétection, et systèmes d'informations géographiques, etc.,)

Les conclusions de cette analyse ont révélé que la pinède aurásienne possède des potentialités de croissance considérables. L'évolution interannuelle de la croissance radiale du pin d'Alep ainsi que sa distribution spatiale tendent à la régression dans la région des Aurès, dans un contexte de conditions climatiques qui sont devenues de plus en plus rudes. La régression a précisément touché la partie sud de la région, déjà exposée aux influences sahariennes, et elle toucherait plus encore ces zones selon les prévisions des projections climatiques à l'horizon de l'an 2055 et l'an 2085.

Les résultats obtenus, présentent ainsi un élément clé dans la prévision du risque et l'adaptation d'une stratégie appropriée à la protection des essences forestières.

Mots clés : Pin d'Alep, Aurès, dendrochronologie, modélisation, géomatique, évolution, changements climatiques