

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département des Sciences Agronomiques



Mémoire De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Agronomie
Spécialité : Écologie Forestière.

Thème :

**Dendroclimatologie du chêne zéen
(*Quercus canariensis* Willd.) du mont Issek
(Béjaïa, Algérie)**

Présenté par : OUIGRA Ghiles

Devant le jury :

Président : Dr RABHI Khellaf,	Professeur	U.M.M.T.O.
Promoteur : Dr SLIMANI Saïd,	Maître de conférences classe A	U.M.M.T.O.
Examineur : Dr ALILECHE Ahmed,	Conservateur principal	PND

Soutenu le / / 2022

Remerciements

En premier lieu, je remercie Dieu, Tout Puissant, pour le courage et la volonté qu'il m'a donné afin d'accomplir ce travail.

Je remercie mon encadrant, M. Slimani Said, qui a suivi ce travail et m'a guidé tout au long de l'accomplissement de ce mémoire.

Je remercie également messieurs Rabhi Khellaf, professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, et Alieche Ahmed, conservateur principal au Parc National du Djurdjura, pour avoir accepté, respectivement, de présider mon jury de soutenance et d'examiner le présent mémoire.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude à M. Tafer Mourad, enseignant à l'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, pour m'avoir reçu dans son laboratoire et assisté dans la procédure de mesure de cernes de croissance.

Je témoigne ma profonde reconnaissance à tous les enseignants et au personnel du département d'Agronomie ainsi qu'à mes camarades de la promotion « Foresterie » pour toutes ces années de savoir et de convivialité.

Je remercie toute ma famille et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

La présente étude traite de la dendroclimatologie du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) au niveau du mont Issek (Béjaïa, Algérie). L'objectif de ce travail consiste à l'analyse de la réponse des arbres échantillonnés à la variabilité climatique à travers l'évolution de la croissance radiale et la relation cerne-climat. Pour ce, 20 sujets sains ont été carottés à la tarière de Pressler et une chronologie de cernes de croissance de référence a été établie pour le site d'étude. La donnée climatique (précipitations totales et températures moyennes mensuelles) utilisée provient de la station météorologique de Béjaïa. Les programmes COFECHA et ARSTAN ont été utilisés, respectivement, dans le contrôle statistique de la qualité de l'interdatation et la standardisation de la chronologie maîtresse. Des corrélations saisonnières entre l'indice de croissance et la donnée climatique ont été calculées avec le programme Seacorr. Les résultats révèlent une forte variabilité interannuelle de l'indice de croissance, mais une sensibilité relativement faible des chênes échantillonnés vis-à-vis de la variabilité climatique. Ceci serait principalement dû au caractère spécifique de l'essence forestière étudiée ainsi qu'aux conditions relativement humides régnant au niveau de notre aire d'échantillonnage, située au cœur du golfe de Béjaïa. L'analyse de la relation cerne-climat montre l'importance des précipitations printanières mais, aussi, de la réserve hivernale pour la croissance radiale. En définitive, cette étude propose plusieurs périodes de l'année sur lesquelles la reconstitution des précipitations pour la région de Béjaïa peut être fiable.

Mots-clés : dendrochronologie, relation cerne-climat, chêne zéen, Béjaïa, Algérie.

Abstract

The current investigation deals with the dendroclimatology of the Algerian oak (*Quercus canariensis* Willd.) forest of mount Issek (Béjaïa, Algeria). The aim of the study was to analyze the response of the sampled trees to climate variability through trends in radial growth and climate-growth relationships. Twenty healthy trees were cored using an increment borer and a master chronology was established for the study area. The climate data sets (monthly precipitation totals and average monthly temperatures) used in this study were provided by the meteorological weather station of Béjaïa. The programs COFECHA and ARSTAN were used to check the accuracy of crossdating and to standardize the tree-ring series respectively. The program Seascorr was adopted to perform seasonal correlations between the growth index and the available climate data. The results revealed a high interannual variability of the growth index, but a relatively low sensitivity of the cored trees towards climate variability. This would mainly be due to intrinsic characters of the studied species as well as to the relatively humid conditions that prevail within the sampled area, which is located in the heart of the Gulf of Béjaïa. The climate-growth analysis showed the importance of the spring and winter seasons' precipitations' for radial growth. Moreover, our findings provide different period of the year on which precipitation reconstruction for the region of Béjaïa would be reliable.

Key-words: dendroclimatology, climate-growth relationships, Algerian oak, Béjaïa, Algeria.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre 1 : Monographie du chêne zéen	
1. Présentation du chêne zéen	2
2. Systématique du chêne zéen.....	2
3. Biogéographie et l'air de repartions de <i>Quercus canariensis</i> Willd.	2
4. Caractères botaniques et anatomique	3
4.1. Les racines	4
4.2. Le tronc.....	4
4.3. L'écorce	4
4.4. Les feuilles.....	4
4.5. Les fleurs	4
4.6. Le fruit	5
4.7. Les rameaux.....	5
4.8. Les bourgeons.....	5
5. Qualités et caractéristiques du bois	5
6. Ecologie du chêne zéen	6
6.1. Exigences climatiques	6
6.2. Exigences édaphiques.....	7
7. Régénération	7
8. Sylviculture du chêne zéen.....	8
9. Facteurs de dégradation du chêne zéen	8
Chapitre 2 : Matériel et Méthodes	
1. Milieu d'étude	10
1.1. Situation géographique du site d'étude	10
1.2. Géologie	10

1.3. Sol.....	10
1.4. Géomorphologie	12
1.5. Végétations	12
1.6. Climat	13
1.7. Etat de la forêt d'étude	13
2. Méthodes	14
2.1. Echantillonnage	14
2.2. Analyse statistique.....	14
2.2.1. Etablissement de la chronologie de référence	14
2.2.2. Analyse de la croissance radiale.....	16
2.2.2.1. Evolution de l'épaisseur du cerne annuel de croissance.....	16
2.2.2.2. Variabilité de la sensibilité moyenne.....	16
2.2.2.3. Standardisations	16
2.2.2.4. Evolutions de l'indice de croissance (chronologie résiduelle)	17
2.2.3. Relation cerne climat.....	17
 Chapitre 3 : Résultats et discussion	
1. Contrôle statistique de l'interdatation et développement de la chronologie maîtresse	19
2. Analyse de la croissance radiale.....	21
2.1. Evolution de l'épaisseur du cerne annuel de croissance.....	21
2.2. Variabilité de la sensibilité moyenne	22
2.3. Standardisation	23
2.4. Evolutions de l'indice de croissance (chronologie résiduelle)	25
3. Relation cerne climat.....	27
Conclusion	33

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques de la chronologie maîtresse	21
Tableau 2 : Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN. (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = Arstan).....	23
Tableau 3 : Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) sur l'intervalle commun des chronologies individuelles du site d'étude.....	24
Tableau 4 : Longueur de la série résiduelle au seuil d'EPS de 0,85	25
Tableau 5 : Périodes présentant les plus fortes corrélations entre l'indice de croissance et les précipitations. r est le coefficient de corrélation de Pearson, * indique un seuil α de 0,05 et ** un seuil de 0,01	31
Tableau 6 : Stabilité temporelle de la corrélation entre l'indice de croissance et les précipitations de la première à la deuxième sous-période d'analyse	32

Liste des figures

- Figure 1 :** Répartition géographique de *Quercus canariensis* Willd dans le monde selon (Quezel et Bonin, 1980) 3
- Figure 2 :** Répartition de *Quercus canariensis* Willd en Algérie d'après (Kaouane 1987 in Rabhi, 2011) 4
- Figure 3 :** Coupe transversale d'un tronc de chêne zéen..... 6
- Figure 4 :** Localisation de la chênaie du mont Issek (Google Earth modifié)..... 11
- Figure 5 :** Vue sur le site d'étude vers le sommet de la montagne..... 12
- Figure 6 :** Surface poncée d'une carotte après montage sur un support en bois rainuré. En haut, un échantillon complet, en bas, une mise au point sur la partie externe de la carotte. On y distingue facilement l'écorce (à droite), les rayons ligneux (lignes claires horizontales) ainsi que les derniers cernes formés sous l'écorce (Photos S. Slimani) 15
- Figure 7 :** Diagramme des longueurs des chronologies individuelles..... 19
- Figure 8 :** Ecoulement de l'eau des précipitations retenue dans le tronc d'un chêne zéen via la cavité laissée par la tarière sur le tronc..... 20
- Figure 9 :** Courbe de croissance de la zénaie d'Issek exprimée en valeurs brutes des largeurs de cernes annuels. Les moyennes mobiles sont présentées sur la dernière année de chaque période..... 22
- Figure 10 :** Evolution de la sensibilité moyenne des arbres sondés. Les moyennes mobiles sont calculées sur 15 ans décalés d'une année et les valeurs sont présentées sur la dernière année de chaque période..... 23
- Figure 11 :** Chronologie maitresse résiduelle pour la zénaie du mont Issek. Les valeurs des moyennes mobiles de 20 ans décalés d'une année sont présentées sur la dernière année de chaque période..... 26
- Figure 12 :** Evolution des précipitations annuelles de la station météorologique de Béjaïa sur la période 1978-2013..... 27
- Figure 13 :** Evolution de la température moyenne de la station météorologique de Béjaïa sur la période 1978-2013..... 28

Figure 14 : Fonction normale de densité de probabilité ajustée de l'indice de croissance et test de normalité de Lilliefors (Conover, 1980 <i>in</i> Meko <i>et al.</i> , 2011)	28
Figure 15 : Corrélations entre l'indice de croissance et les variables climatiques saisonnières En haut les corrélations avec la variable climatique primaire, les précipitations(P). En bas les corrélations avec la variable climatique secondaire, la température (T). L'astérisque (*) indique les mois de l'année $t-1$	29
Figure 16 : Diagrammes de dispersions entre les précipitations (P) et l'indice de croissance. Les meilleures corrélations sont illustrées pour les périodes d'un mois, de 3, de 6 et de 12 mois.....	31

Introduction

Introduction

En Algérie, la chênaie caducifoliée représente 6,9 % de la superficie forestière totale (Messaoudene, 2006 *in* Rabhi, 2011). Elle est très inégalement répartie et les plus belles forêts denses se localisent dans les montagnes de Kabylie et de l'est du pays jusqu'à la frontière tunisienne (Quézel et Bonin, 1980).

L'approche dendrochronologique a été utilisée depuis quelques décennies pour appréhender la réponse de nos forêts à la variabilité climatique. La plupart des études réalisées à cet effet reposent sur des chronologies de cernes de croissances de résineux (Safar, 1994 ; Touchan *et al.*, 2008 ; Alileche, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014 ; Slimani *et al.*, 2014 ; 2021, Sarmoum *et al.*, 2018) ; peu de travaux se sont penchés sur la relation cerne-climat impliquant des feuillus caducifoliés (Messaoudene, 1989, Messaoudene et Tessier, 1991, 1997 ; Touchan *et al.*, 2010, 2017).

A notre connaissance, aucune reconstitution dendroclimatique n'a reposé sur des chronologies provenant uniquement de cernes de croissance de feuillus. Dans ce contexte, la présente étude traite de la relation cerne-climat au niveau d'une forêt de chêne zéen, située sur les hauteurs du mont Issek (Béjaïa, Algérie). L'analyse de la croissance radiale est appréhendée à travers l'évolution de l'épaisseur du cerne annuel de croissance. La réponse à la variabilité climatique est dans un premier temps approchée via la sensibilité moyenne des arbres échantillonnés ainsi que les tendances d'évolution de l'indice de croissance. Ensuite, des corrélations saisonnières ont été réalisées afin de mettre en exergue le facteur climatique contrôlant le plus la croissance radiale de la forêt d'étude et de déterminer les périodes de l'année sur lesquelles la reconstitution de ce paramètre est possible.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier est consacré à la monographie de notre matériel biologique, *Quercus canariensis* Willd. Dans le deuxième chapitre est présenté un aperçu du site d'étude ainsi que les méthodes adoptées. Le troisième et dernier chapitre rapporte l'essentiel des résultats obtenus ainsi que leur discussion.

Chapitre I
Monographie du chêne zéen

1. Présentation du chêne zéen

Le chêne zéen fait partie d'un groupe d'espèces caducifoliées réparties sur le pourtour méditerranéen et situées principalement dans l'ensemble ibéro-maghrébin (Quézel et Bonin, 1980). Il occupe une superficie de 102 000 ha, dont 65 000 ha en Algérie (Messaoudène et Tessier, 1991), 20 000 ha en Tunisie et 17 000 ha au Maroc (Tafer, 2000). Ce chêne a une longévité remarquable. Des arbres majestueux, âgés de plus de 550 ans et dont la circonférence peut atteindre huit mètres, ont été observés dans les zénaies de Kabylie (Messaoudène et Tissier, 1991).

2. Systématique

La classification du chêne zéen est sujet d'un grand débat entre les botanistes (Emberger, 1939 ; Quezel et Santa, 1962). La classification la plus commune est celle rapportée par (Ourlis, 2001) :

Règne : *Plantae* ;

Embranchement : Spermaphytes ;

Sous-Embranchement : Angiospermes ;

Classe : Dicotylédones ;

Ordre : *Fagales* ;

Famille : *Fagaceae* ;

Sous-famille : Quercucinéés ;

Genre : *Quercus* ;

Sous-genre : *Cerris* ;

Espèce : *Quercus canariensis* Willd.

3. Biogéographie

L'aire de distribution du chêne zéen se localise au niveau de la partie occidentale du bassin méditerranéen (territoire ibéro-maghrébin) (figure 1). Au Maroc, il est présent dans le Rif, le Plateau Central, le Moyen Atlas et même dans le Haut Atlas (Achhal *et al*, 1980). En Tunisie, il est en mélange avec le chêne-liège. Il forme toutefois deux vastes massifs à Feidja

et Ain Draham. Il se retrouve également en Espagne, au Portugal, et quelque fois dans le sud-ouest de la France (Zulueta, 1980).



Figure 1. Répartition géographique de *Quercus canariensis* Willd dans le monde selon (Quezel et Bonin, 1980).

En Algérie, le chêne zéen est commun dans les montagnes du nord du pays (figure 2). A l'ouest, il est représenté par la sous-espèce *Quercus tlemciensis* (Alcaraz, 1989 in Rabhi, 2011). Il forme de très beaux peuplements en Kabylie (Ait Ghobri, Akfadou, Babors, Tamesguida, Kefrida et Tassentout), dans la région de Jijel (forêt de Guerrouch), à Annaba (forêt de l'Edough) et à l'extrême est (Djebel Ghora, El Kala et Souk-Ahras). De petits peuplements à l'état disséminé sont localisés dans la région de Ténès, à Teniet El Had, à Cherchel, à Chréa, dans le Djurdjura, l'Aurès et le Hodna (Kaouane, 1987 in Rabhi, 2011).

En Kabylie, le chêne zéen, représenté par la sous-espèce *Quercus canariensis* willd, est considéré comme une essence dominante jusqu'à 1646 m d'altitude où il occupe environ 45 % de la superficie boisée (Messaoudene *et al*, 2007) (figure 2).

4. Caractères botaniques et anatomiques

Les principales caractéristiques botaniques du chêne zéen sont fournies par (Lapie et Maigre, 1914, Maire, 1926, Boudy, 1950, Quézel et Santa, 1962 et Stewart, 1974).

4.1. Les racines

L'enracinement est profond, pivotant et puissant.

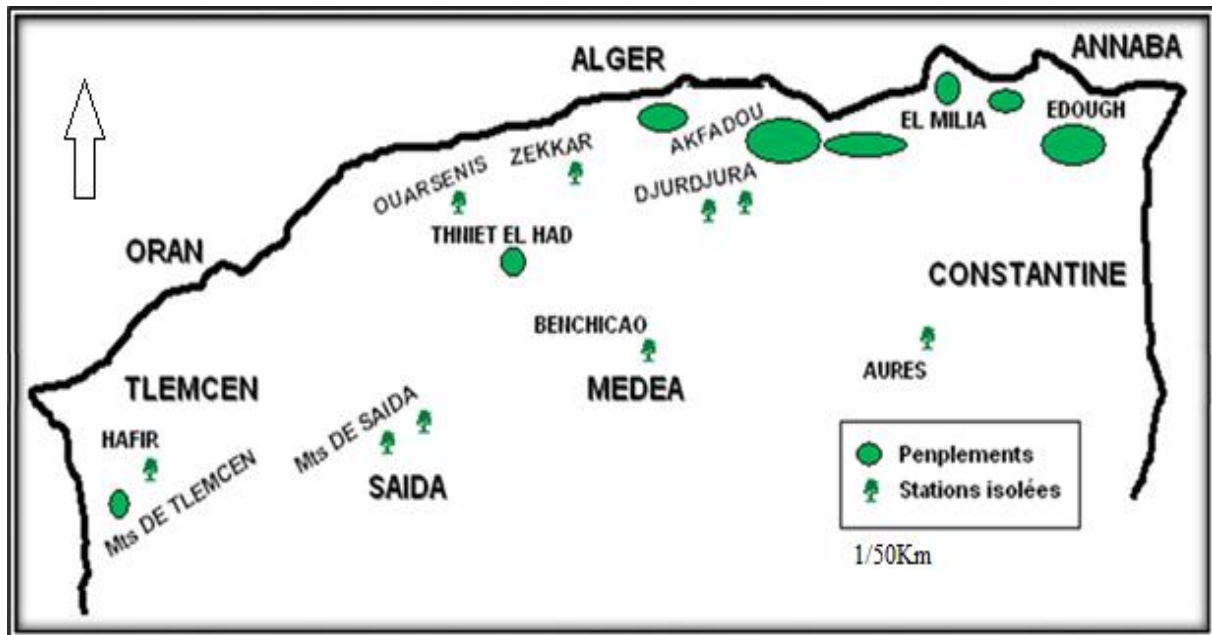


Figure 2. Répartition de *Quercus canariensis* en Algérie d'après (Kaouane 1987 in Rabhi, 2011).

4.2. Le tronc

Le chêne zéen présente un tronc élancé avec une circonférence de 1,20 m vers 100 ans. Cette dernière peut atteindre 8 m à l'âge de 550 ans (Messaoudène et Tissier, 1991).

4.3. L'écorce

L'arbre du chêne zéen porte une écorce grise profondément fissurée.

4.4. Les feuilles

Les feuilles sont caduques ovales, sinuées, dentées et pubescentes à la face supérieure. Leur longueur est de 5 à 20 cm et leur largeur de 4 à 12 cm.

4.5. Les fleurs

Les inflorescences mâles et femelles sont portées par le même pied (avril-mai). Les chatons mâles sont groupés sur un rachis plus ou moins velu, alors que les inflorescences femelles sont assez courtes, tomenteuses et avec un stylet court.

4.6. Le fruit

Le fruit du chêne zéen est un gland à cupule peu profonde recouvert d'écailles lancéolées et planes.

4.7. Les rameaux

Les rameaux sont abondants, forts et tomenteux.

4.8. Les bourgeons

Les bourgeons du chêne zéen sont de forme ovoïde et protégés par des écailles.

5. Qualités et caractéristiques du bois

Quercus canariensis fournit un volume considérable de bois d'œuvre et d'industrie, mais n'a bénéficié que de quelques études très restreintes de par leurs objectifs et leur échantillonnage (Berrichi, 1993).

Le bois du chêne zéen est de couleur jaune claire, à aubier épais avec des cernes nettement distincts. Les rayons ligneux sont très larges ou très fin et nombreux et se composent de 18 cellules en moyenne (Ameels, 1989).

En vue macroscopique, le bois du chêne zéen présente de gros rayons ligneux multi-sériés et de petits rayons unisériés, à l'origine d'une belle maillure du bois lorsqu'il est débité en quartiers. La zone du bois initial se caractérise par de gros vaisseaux alignés en bandes tangentielles et isolés les uns des autres. En revanche, le bois final est formé de vaisseaux nettement plus petits et de taille variable. Les fibres sont très nombreuses dans le bois final, irrégulièrement réparties et à trajet rectiligne-oblique (Ameels, 1989 ; Haddad, 1990).

Les cellules de la partie centrale cessent de fonctionner et forment le duramen ou le bois de cœur généralement plus foncé que l'aubier qui se retrouve entre l'écorce et le duramen (figure 3).

Aujourd'hui, les avis sur la qualité du bois de ce chêne sont variables et parfois contradictoires. La majorité des forestiers considèrent, sans argument scientifique, le bois de chêne zéen comme étant de qualité médiocre et lui accordent très peu d'intérêt.

(Messaoudène, 1996) rapporte que le duramen de cette espèce résiste mal aux attaques de champignons. Entre autres, l'auteur y cite les inconvénients suivants :

- Retraits très importants au séchage ;
- Très difficiles à sécher ;

- Aubier très épais ;
- Cœur souvent très fendu.



Figure 3. Coupe transversale sur un tronc de chêne zéen (Photo S. Slimani).

6. Ecologie du chêne zéen

6.1. Exigences climatiques

Le Chêne zéen ne forme des peuplements que dans les stations fraîches et bien arrosées et les bassins versants ombragés (Maire, 1926). Il ne vit que dans les régions à fortes précipitations (au moins 800 mm/an) et ne prend son plein développement qu'aux expositions nord (Messaoudène et Tessier, 1991) et dans celles recevant plus de 1 000 mm/an sur les versants sud (Boudy, 1955).

En Algérie, il ne prospère qu'en étage bioclimatique humide et de manière moindre en étage subhumide (Ledant, 1975). C'est une essence exclusivement montagnaise de moyenne à haute altitude, variant de 800 à 1 800 m. En Kabylie, (Messaoudène, 1989) rapporte que sur le versant nord, le chêne zéen prédomine par rapport au chêne afarès entre 650 m à 1 646 m d'altitude, alors qu'il se laisse carrément envahir par les chêne afarès et le chêne-liège sur les versant sud, sur les crêtes relativement sèches et à altitudes inférieures à 1400m. Par contre en Europe, grâce à une haute latitude, le chêne zéen occupe des altitudes plus basses.

(Hamrani, 1987) note que le chêne zéen supporte bien la neige et le froid, avec des températures allant jusqu'à -8°C et une amplitude thermique moyenne de l'ordre de 8 à 14°C .

6.2. Exigences édaphiques

Le chêne zéen est une essence qui donne naissance à des sols plus complets et plus profonds, et sa régénération est facile sur les sols basaltiques, granitiques, les terrains calcaires fissurés et sur les schistes. Par contre, sur les grès durs et calcaires, l'altération de la roche mère est difficile, ce qui ralentit la pédogénèse et il résulte que les sols dans ce type de substrat restent plus ou moins superficiels (Boudy, 1950).

7. Régénération

Le chêne zéen se reproduit par semence, par rejets de souche ou par drageons. Ceci permet de traiter les arbres en régimes de futaie, de taillis ou selon le régime mixte de taillis sous futaie. Par ailleurs, d'excellents résultats sont obtenus à partir de leur tissu et de leur bouture en culture in-vitro (Messaoudène, 1996).

Selon Taibi (2012), les méthodes de régénération appropriées de cette espèce sont :

Régénération naturelle

Cette méthode consiste à régénérer et/ou renouveler les peuplements de chêne zéen en place à partir de leur propre semence.

Régénération artificielle

Cette méthode peut se faire par semis direct et par plantation. La première consiste à semer directement les glands dans une parcelle préalablement préparée de telle sorte à obtenir une densité minimale de 2 500 pieds/ ha. Contrairement au semis direct, la plantation consiste à planter des plants âgés de 2 à 3 ans préalablement élevés en pépinière.

Régénération par rejets de souche

Le chêne zéen a une aptitude remarquable à rejeter des souches. Pour espérer obtenir un taillis conforme aux normes, la souche doit représenter une section de coupe inclinée ou légèrement bombée, sans esquilles et sans déchirures de l'écorce.

Par ailleurs (Messaoudène, 1996), signale que d'excellents résultats de régénération sont obtenus à partir de tissus de chêne zéen ainsi que de leurs boutures en culture in vitro.

8. Sylviculture

Selon (Boudy, 1950), il y a trois types spécifiques de peuplement de chêne zéen :

La futaie pleine

Elle est formée de peuplements denses plus ou moins épais de semis et en compte en moyenne 400 sujets à l'hectare de 100 à 120 ans.

La futaie jardinée

C'est le type le plus habituel des peuplements purs de zéen avant toute intervention humaine. Les sujets, soit de franc pied soit de souche, sont répartis au hasard et présentent une gamme complète de tous les âges jusqu'à 60 ans. La forêt forme donc un complexe assez hétérogène de peuplements irréguliers. En somme, les peuplements irréguliers de ce genre constituent un type de forêt transitoire.

Les Peuplements mélangés

Ce sont les plus communs en basses altitudes ou à la limite supérieure de son aire de distribution. Dans ce cas, le chêne zéen est le plus souvent mêlé en proportion variable avec le chêne-liège, le chêne afarès, et le chêne vert.

9. Facteurs de dégradation

La dégradation du chêne zéen est le résultat de l'influence de plusieurs facteurs naturels, anthropiques, historiques et de gestion forestière. Les capacités de résistance de la forêt ont beaucoup diminué et les signes de sa dégradation sont très apparents (Hasnaoui *et al*, 2004).

Parmi les dégâts causés par les insectes en forêt de chênes, la réduction de la croissance, les dépréciations de la qualité technologique du bois et même la destruction totale des arbres. Les insectes défoliateurs les plus dangereux sont les Lépidoptères, à l'image de *Tortrix viridana*, *Lymantria dispar* et *Cyrambysbero var merbickii* (Ariche, 1991). Un autre type d'insecte peuvent agir comme vecteur. *Scolytus intricatus* qui joue un rôle actif avec son développement rapide dans une écorce du tronc et des charpentes lui permettrait un contact aisé avec un parasite et ses fructifications. Les blessures qu'il inflige aux jeunes rameaux assureraient aux champignons un accès au xylème de l'arbre (Pinon, 1990).

Depuis la fin du XIX^e siècle, la dégradation du bois par les champignons lignivores, tant du point de vue biochimique que des modifications de l'ultrastructure du bois dégradé a fait l'objet de nombreux travaux (Ravilly, 1971). La maladie de l'oïdium est la plus commune et la plus grave chez les chênes (Semal, 1988 *in* Tafer, 2000). L'agent inféodé aux *Fagaceae* (chêne en particulier) est *Microsphaera alphitoides* (Mansour, 1984 *in* Touzouirt, 2018).

Chapitre II

Matériel et méthodes

1. Milieu d'étude

1.1. Situation géographique du site d'étude

Le présent travail a été mené au niveau de la forêt du mont Issek, dans la partie centrale des Babors, à environ 23 km à vol d'oiseau au sud-est de la ville de Bejaia (nord de l'Algérie) (figure 4) Faisant face à la mer Méditerranée, ce massif s'érige entre les communes de Tizi N'Berber (au nord) et d'Ait Smail (au sud), dont la limite administrative est naturellement fixée au niveau de la ligne de crête culminant à environ 1734 m d'altitude.

Le mont Issek présente un contraste saisissant entre ses deux versants : faisant face à la mer Méditerranée, l'ubac est plutôt humide et très verdoyant ; l'adret est, au contraire, sec, rocheux, asylvatique et présente une couverture végétale très faible (figure 5). D'ailleurs, les riverains du versant sud désignent cette même montagne sous le nom d'Adrar n Fad (mont de la soif).

La forêt d'étude fait partie de la circonscription des forêts de Souk El Tenine, dépendant de la conservation des forêts de la wilaya de Béjaïa.

Notre aire d'échantillonnage est située vers le sommet de la montagne et est comprise entre les coordonnées géographiques suivantes : 36°33'59,9'' N à 36°34'08,6'' N et 005°13'08,7'' E à 005°13'28,4'' E.

1.2. Géologie

Les Babors en général et la structure géologique de la zone d'étude en particulier appartiennent au domaine tellien nord-oriental. Constituant la côte du golfe de Bejaïa, leurs chaînons calcaires séparent la Petite Kabylie de la Grande Kabylie. Les parties les plus internes du domaine tellien y sont visibles. L'essentiel des déformations continues est acquis à la fin du Crétacé. L'évolution tectonique mésozoïque, complexe, est considérée comme représentative de celle de toute l'orogénie tellienne. Elle est liée à la position particulière de ce domaine sur la marge nord de la plaque africaine et peut être assimilée à une vaste zone décrochant subissant les effets du coulisage senestre de l'Afrique par rapport à l'Europe durant la première partie du Mésozoïque (Obert, 1984).

1.3. Sol

Le mont Issek est caractérisé par un sol instable, composé par des calcaires, des schistes et des grés marqués par une forte porosité et un drainage rapide (Duplan, 1952 ; Obert, 1974). Une litière épaisse est formée au niveau du versant nord.



Figure 4. Localisation de la chênaie du mont Issek (Google Earth modifié)



Figure 5. Vue sur le site d'étude vers le sommet de la montagne (Photo S. Slimani).

1.4. Géomorphologie

L'aire échantillonnée est une zone montagneuse de 1 588 m à 1 689 m d'altitude, se présentant sur des pentes raides allant de 50 à 70 %. La plupart des arbres carottés sont situés vers le sommet de la montagne. Toutes les expositions sont représentées.

1.5. Végétations

Le site d'étude est une chênaie à *Quercus canariensis* et *Q. afares*. La strate arborescente est, par endroit, marquée par une présence importante d'*Acer monspessulanum* et une présence mineure de *A. campestre*, *Sorbus torminalis* et *Prunus avium*. Un nombre important de ces arbres sont utilisés comme un support par *Hedera helix*. La strate arbustive est bien fournie. Elle est principalement représentée par *Coriaria myrtifolia*, *Crataegus laciniata*, *Ilex aquifolium*, *Rhamnus alpina*, *R. lycioides*, *Rosa sicula*, *Rubus incanescens*, *R. ulmifolius*... La strate herbacée est riche en espèces. Entre autres, on cite la présence de *Ampelodesmos mauritanicus*, *Arabis alpina ssp. caucasica*, *Arctium minus*, *Artemisia atlantica*, *Atractylis cancellata*, *Blackstonia perfoliata*, *Bupleurum montanum*, *B. spinosum*, *Carlina involucrata*, *Catananche coerulea*, *Cerastium glomeratum*, *Cirsium echinatum*, *C. casabonae ssp. trispinosum*, *Cynosurus balansae*,

C., *Dactylis glomerata*, *Dianthus caryophyllus*, *Erodium chium*, *Festuca atlantica*, *Helichrysum stoechas*, *Hieracium pseudopilosella*, *Inula montana*, *Iris unguicularis*, *Jurinea humilis*, *Onosma fastigiatum*, *Origanum glandulosum*, *Paeonia corallina*, *Phlomis bovei*, *Sambucus ebulus*, *Scabiosa columbaria*, *S. crenata*, *Sedum acre*, *Sideritis montana*, *Teucrium chamaedrys*, *T. kabylicum*, *T. polium*, *Trifolium campestre*, *Tunica prolifera*, *Xeranthemum inapertum* et *Vinca difformis*.

1.6. Climat

La synthèse climatique repose sur les données climatiques de la station météorologique de Béjaïa (2 m d'altitude) pour la période 1973 à 2015 (annexe 1). Des corrections y ont été apportées par rapport à l'altitude moyenne de l'aire d'échantillonnage, qui est de 1 639 m.

Selon (Seltzer, 1946), l'abaissement des températures maximales est de 0,7 °C pour les températures maximales pour une élévation de 100 m d'altitude et celles des minimales est de l'ordre de 0,4 °C pour la même dénivelée. Les précipitations sont, quant à elles, augmentées de 40 mm pour chaque 100 m d'altitude.

La température moyenne annuelle de notre site d'étude est de 8,93 °C. Le mois le plus chaud est août avec une moyenne des maxima (M) de l'ordre de 18,38 °C. Le mois le plus froid est janvier avec une moyenne des minima (m) de l'ordre de 0,95 °C.

Le cumule moyen des précipitations annuelles est de l'ordre de 1 459,57 mm. Dans le mont Issek, les chutes de neige sont enregistrées à partir du mois de novembre et peuvent, exceptionnellement, aller jusqu'au début du mois de mai. Les brouillards y sont fréquents.

Les calculs mettent en évidence que notre site d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen avec un hiver frais et pluvieux et un été chaud et sec. La période sèche est de trois mois : elle s'étale de juin à fin-août. Par ailleurs, notre aire d'échantillonnage est située dans l'étage bioclimatique hyper-humide à hiver frais.

1.7. Etat de la forêt d'étude

Notre milieu d'étude subit une pression anthropique importante. A l'image de la plupart de nos forêts, le pâturage y est quasi-permanent. La fréquence des incendies est très élevée, notamment en basses et moyennes altitudes, où la formation végétale est réduite à un maquis dégradé, voire à une broussaille. Aussi, des coupes illégales sont souvent observées dans les zones boisées, notamment en hautes altitudes.

2. Méthodes

2.1. Echantillonnage et préparation des échantillons

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée dans la forêt mixte à *Q. canariensis* et *Q. afares* du mont Issek. L'opération a eu lieu au cours de l'été 2016 sur 20 sujets sains de *Q. canariensis*.

Dans ce genre de l'étude on utilise un échantillonnage dirigé. Deux carottes sur des positions opposées, ont été prélevées sur chaque arbre à l'aide d'une tarière de Pressler sur une hauteur de référence de 1,30 m en tenant compte que le nombre de cernes soit suffisant (50 minimum) pour permettre l'interdatation des échantillons (Touchan *et al*, 2008, 2010).

Les échantillons ont été directement mis dans des étuis en papiers. Ceci facilite leur transport et minimise grandement leur risque de détérioration entre le travail de terrain et leur manipulation au laboratoire. Enfin, les cavités créées par la mèche de la tarière ont été obturé par du mastic de bois afin d'assurer une meilleure protection des arbres échantillonnés.

Les carottes prélevées ont été laissées sécher graduellement à l'air libre, puis montées (fixées avec de la colle à bois) sur des supports en bois rainurés. Les échantillons ont été ensuite poncés avec du papier de verre grossier, puis graduellement avec des papiers de plus en plus fins (Yamaguchi et Brunstien, 1991) afin d'améliorer la lisibilité des cernes annuels de croissance. Le chêne zéen étant un arbre avec un bois à zone initiale poreuse bien marquée, la limite entre les cernes de croissance est plutôt indiquée par la position des gros vaisseaux du bois initial (figure 6).

2.2. Analyse statistique

2.2.1. Etablissement de la chronologie de référence

Dans notre cas, l'année de la formation du dernier cerne sous l'écorce est 2016. Dans un premier temps, une datation visuelle des carottes a été effectuée par un simple compte à rebours à partir de ce cerne en direction de la moelle.

Les échantillons ont été ensuite interdatés afin de s'assurer du bon calage chronologique des séries élémentaires (Lebourgeois et Mérian, 2012). L'interdatation constitue le meilleur moyen de vérifier l'agencement synchrone des séries chronologiques afin de corriger d'éventuelles erreurs de datation et d'assigner à chaque cerne de croissance l'année exacte de sa formation (Douglass, 1939, 1946 ; Fritts, 1976). La procédure a reposé sur la méthode *skeleton plot*, qui est une technique de représentation schématique basée sur l'identification de cernes diagnostiques (ou caractéristiques) selon les techniques classiques largement éprouvées en dendrochronologie et décrites par Douglass (1946) et Stokes et Smiley (1996).

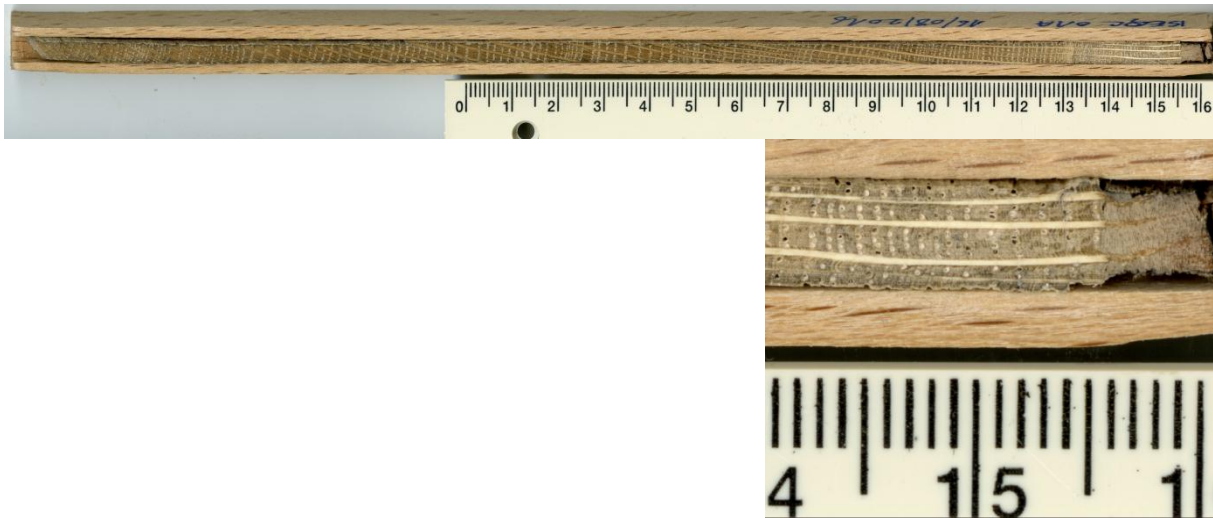


Figure 6. Surface poncée d'une carotte après montage sur un support en bois rainuré. En haut, un échantillon complet, en bas, une mise au point sur la partie externe de la carotte. On y distingue facilement l'écorce (à droite), les rayons ligneux (lignes claires horizontales) ainsi que les derniers cerne formés sous l'écorce (Photos S. Slimani).

Au moment de la collecte des échantillons (été 2016), le dernier cerne formé sous l'écorce semble ne pas être complet (figure 6). De ce fait, la mesure des cerne de croissance a pris comme dernier cerne celui formé en 2015.

La mesure des largeurs des cerne de croissance a été effectuée de la moelle vers l'écorce avec une précision de l'ordre de 0,01 mm à l'aide d'une table de mesure semi-automatique *LINTAB* associée à un logiciel enregistreur automatique *TSAP-Win*. Cette opération est réalisée en prenant soin de bien orienter l'échantillon de façon à ce que l'axe de mesure soit parfaitement perpendiculaire à la limite du cerne mesuré (Delwaide et Filion, 2010).

Le contrôle statistique de la qualité de l'interdatation de la chronologie maîtresse a été réalisé avec le programme *COFECHA* (Holmes, 1983), qui vérifie la fiabilité de l'interdatation en corrélant les segments successifs d'une série élémentaire donnée avec une chronologie de référence issue des séries élémentaires restantes. Nous avons utilisé une longueur du segment de cerne de 50 ans. Pour un recouvrement de 50 % à chaque étape de vérification, les segments successifs sont décalés de 25 ans.

2.2.2. Analyse de la croissance radiale

2.2.2.1. Evolution de l'épaisseur du cerne annuel de croissance

L'évolution de l'épaisseur moyenne du cerne annuel (chronologie maîtresse) a été appréhendée en utilisant une courbe de croissance avec moyenne mobile de 15 ans décalés d'une année.

2.2.2.2. Variabilité de la sensibilité moyenne

La sensibilité moyenne mesure le changement relatif moyen entre des cernes annuels adjacents. Elle exprime l'ampleur des changements affectant à court terme la largeur des cernes, donnant ainsi une estimation de l'impact des fluctuations climatiques sur ces derniers (Fritte, 1976).

La sensibilité (S_x) est calculée pour les chronologies individuelles de chaque arbre et pour la chronologie maîtresse, en considérant la différence relative en valeur absolue entre deux indices de croissance successifs (Fritts, 1976), selon la formule suivante :

$$S_x = 2|I_{t+1} - I_t| / (I_{t+1} + I_t)$$

I_t et I_{t+1} sont les valeurs d'indices de croissance adjacents. Afin d'analyser l'évolution de la sensibilité moyenne des arbres sondés (SM_x), des calculs ont été effectués sur l'ensemble des séries individuelles sur une moyenne mobile de 15 ans décalés d'une année.

2.2.2.3. Standardisation

La standardisation constitue une étape importante, parfois obligatoire, dans le traitement des séries chronologiques (Schulman, 1954). L'objectif de cette procédure d'ajustement est de minimiser les effets et tendances non liés à la variation climatique (Cook, 1985), qui génèrent des signaux dans la chronologie maîtresse brute, entre autres, à l'âge de l'arbre, à la compétition et à d'éventuelles perturbations (Fritts, 1976). La standardisation a été effectuée avec le programme *ARSTAN* (Cook, 1985 ; Cook et Holmes, 1999) en utilisant la fonction spline cubique de lissage avec une fenêtre définie à 67 % de la longueur de la série (Cook et Briffa, 1990) pour établir une courbe de croissance théorique. Ensuite, les indices de croissance ont été obtenus par division de chaque valeur d'épaisseur de cerne sur la valeur correspondante sur la courbe de croissance théorique. Cette procédure transforme les mesures de largeurs de cernes en indices de croissance de dimension uniforme indépendamment des différences d'âge et de croissance entre les arbres, aboutissant ainsi à des chronologies caractérisées par une variabilité relativement homogène dans le temps, avec une moyenne de l'ordre d'un (Fritts, 1976). Enfin, un préblanchiment des séries a été appliqué afin de retirer

l'autocorrélation résiduelle dans les séries détendancées. Le modèle autorégressif utilisé s'est basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC, *Akaike information criterion*) le plus petit.

Les principales statistiques utilisées dans la caractérisation du signal contenu dans notre chronologie sont : *i*) la sensibilité moyenne, *ii*) l'autocorrélation d'ordre 1, *iii*) l'intercorrélacion moyenne, *iv*) la variance du premier vecteur propre et *v*) le signal exprimé dans la population ou EPS (*expressed population signal*).

Comme cité précédemment, la sensibilité moyenne exprime l'ampleur des changements affectant à court terme la largeur des cernes, donnant ainsi une estimation de l'impact des fluctuations climatiques interannuelles sur ces derniers (Fritts, 1976).

L'autocorrélation d'ordre 1 estime l'interdépendance entre deux cernes successifs. Elle quantifie l'effet de la persistance liée aux conditions conduisant à l'élaboration du cerne de l'année $t-1$ sur la mise en place du cerne de l'année suivante t (Lebourgeois et Mérian, 2012).

L'intercorrélacion des séries individuelles est exprimée par le coefficient de corrélation de Pearson.

Le premier vecteur propre exprime le plus fort pourcentage de la variance totale d'un nuage de points. Les séries étant standardisées, la variance du premier vecteur propre est relative à la qualité du signal climatique contenu dans les cernes de croissance.

L'EPS est un paramètre appréciable pour quantifier la robustesse des chronologies utilisées dans l'analyse climatique. La longueur de la chronologie retenue pour cette analyse est basée sur un seuil d'EPS de 0,85 couramment utilisé pour admettre la bonne représentativité de la chronologie moyenne (Wigley *et al.*, 1984).

2.2.2.4. Evolutions de l'indice de croissance

La standardisation de la donnée brute génère trois séries ajustées (Standard, Résiduelle et Arstan). Seule la chronologie qui présente les meilleurs paramètres statistiques pour une analyse cerne-climat est retenue. L'évolution de l'indice de croissance est présentée sur une courbe oscille autour d'une moyenne de l'ordre de un.

Le fichier de sortie du programme COFECHA (annexe 2) a été utilisé pour l'identification des années caractéristiques (cernes minces et épais).

2.2.3. Relation cerne-climat

L'analyse cerne-climat repose sur la donnée climatique instrumentale mensuelle de la station météorologique de Béjaïa incluant les précipitations totales et les températures

moyennes couvrant la période 1978-2013, le seul jeu de donnée à fournir une réponse significative intéressante.

Le programme Seascorr (Meko *et al.*, 2011) a été utilisé pour déterminer les corrélations entre l'indice de croissance (variable dépendante) et les deux variables climatiques sus-citées (variables indépendantes). Pour 1 000 itérations, la procédure de calibration/vérification fournit 1 000 estimations du coefficient de corrélation de vérification pour le régresseur climatique. En plus des corrélations calculées sur différentes périodes de l'année, allant de un à 12 mois, ce programme teste la stabilité temporelle de ces corrélations en considérant le jeu de donnée climatique total (1978-2013) sur deux sous-période (1978-1995 et 1996-2013).

Chapitre III

Résultats et discussion

1. Contrôle statistique de l'interdatation et développement de la chronologie maîtresse

Les résultats du contrôle statistique de l'interdatation sont consignés sur la (figure 7) et dans le tableau 1.

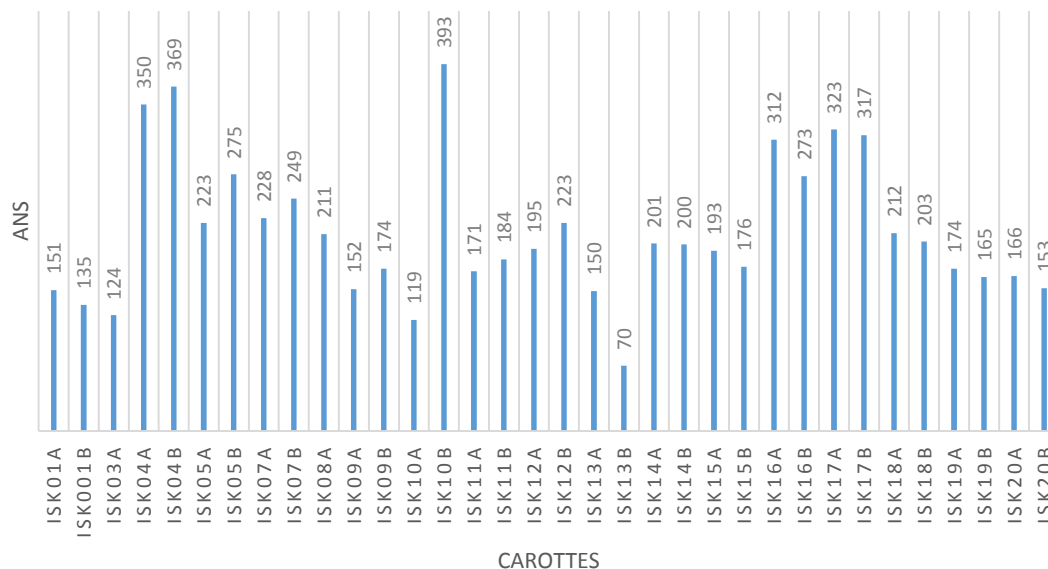


Figure 7. Diagramme des longueurs des chronologies individuelles.

La longueur des chronologies individuelles utilisées dans cette étude est très variable. Il y a lieu de signaler que les périodes couvertes par les échantillons collectés ne correspondent pas automatiquement à l'âge des arbres sondés. C'est le cas pour les sujets dont le rayon dépasse largement la longueur de la tarière. Il en est de même pour les arbres dont les échantillons recueillis ne sont pas entièrement exploitables. En effet, plusieurs arbres d'apparence en bonne santé sont réellement pourris et/ou vides à l'intérieur et rempli d'eau des précipitations, qui s'écoule parfois abondamment de la mèche de la tarière à l'extraction d'une carotte (figure 8).

Dix-huit arbres sur les 20 échantillonnés ont été interdatés avec succès. Ceci dit, certaines carottes n'ont été prises en considération que partiellement car leur datation n'a pas été concluante.

La série la plus longue s'étend sur 393 ans (carotte 10B) ; la chronologie la plus courte s'étale quant à elle sur seulement 70 ans (carotte 13B). La moitié des carottes collectées dépassent les 200 ans (figure 7).



Figure 8. Ecoulement de l'eau des précipitations retenue dans le tronc d'un chêne zéen via la cavité laissée par la tarière sur le tronc (Photo S. Slimani).

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques de la chronologie maîtresse générées par le programme COFECHA. Cette série de référence couvre 393 ans, de 1623 à 2015. Aucune anomalie de structure liée aux cernes absents ou existence de faux cernes ni de possibles erreurs de datation n'ont été détectées.

Les arbres sondés affichent une intercorrélacion entre les séries individuelles plutôt élevée (0,57). Ceci suggère que les arbres sondés se développent au sein d'un peuplement où règnent des conditions écologiques plus ou moins homogènes. En effet, le gradient altitudinal de l'aire d'échantillonnage est inférieur à 100 m et, même si les arbres sondés se présentent sur différentes expositions, ils sont localisés vers le sommet de la montagne. L'atténuation des différences de croissance entre les arbres échantillonnés peut aussi être attribuée à l'humidité élevée due à la proximité du site d'étude à la mer Méditerranée.

La sensibilité moyenne est de l'ordre de 0,21. Des résultats similaires ont été signalés dans le Djurdjura par (Slimani, 2014) pour quelques peuplements de cèdre de l'Atlas, tandis que d'autres, notamment sur le versant nord (Tala Guilef), ont affiché des sensibilités moyennes plus faibles. Nos arbres sont largement moins sensibles que ceux de la cédraie de Takoucht (0,29), située à quelques encablures de notre site d'étude (Ourdani, 2017). Faisant face à la mer, le mont Issek bénéficie plus de l'humidité de l'air marin que le massif de

Takoucht. Les arbres qui se développent sur ce dernier site font face à plus de conditions de sécheresse, qui augmentent drastiquement leur sensibilité à la variabilité climatique. Des sensibilités moyennes plus élevées encore (0,30-0,31) sont également rapportées par (Slimani, 2014) pour les cédraies de l'Atlas saharien de l'Aurès et du Belezma. Néanmoins, l'influence de la nature de l'essence forestière n'est pas à négliger. En effet, Carnicer *et al.* (2013) signalent des réponses contrastées entre les angiospermes et les gymnospermes à la variabilité climatique. Ruiz-Benito *et al.* (2017) soulignent le fait que les conifères soient plus sensibles au changement climatique que les caducifoliés.

Tableau 1. Principales caractéristiques de la chronologie maîtresse.

Principales caractéristiques	Statistiques
Nombre d'arbres	18
Nombre de carottes datées	34
Longueur de la chronologie maîtresse	1623-2015 (393 ans)
Nombre de cernes absents	00
Nombre de faux cernes	00
Segment avec de possible erreur de datation	00
Intercorrélation	0.57
Sensibilité moyenne	0.21

2. Analyse de la croissance radiale

2.1. Evolution de l'épaisseur du cerne annuel de croissance

L'évolution de l'épaisseur du cerne de croissance de la chronologie maîtresse est présentée dans la figure 9. La valeur maximale a été enregistrée en 1654 avec 2,24 mm et la valeur minimale a été obtenue en 1626 avec une valeur de 0,26 mm.

La courbe de la moyenne mobile sur 15 ans décalés d'une année révèle des périodes de croissance élevée et d'autres faibles. Cette croissance est sous l'influence d'une combinaison de facteurs environnementaux et l'épaisseur du cerne reflète un bilan annuel de la croissance radiale (Nicault *et al.*, 2010). En général, l'arbre élabore des cernes relativement larges dans son jeune âge et des cernes de plus en plus minces à l'âge adulte, avant de se stabiliser jusqu'à sa mort (Nicault *et al.*, 2010 ; Lebourgeois et Mérian, 2012). Cette décroissance reflète la progression géométrique de la circonférence des cernes au fur et à mesure que le diamètre des

arbres augmente (Fritts, 1976 ; Cook *et al.*, 1990). Dans notre cas, cette tendance est plus nette sur les deux derniers siècles.

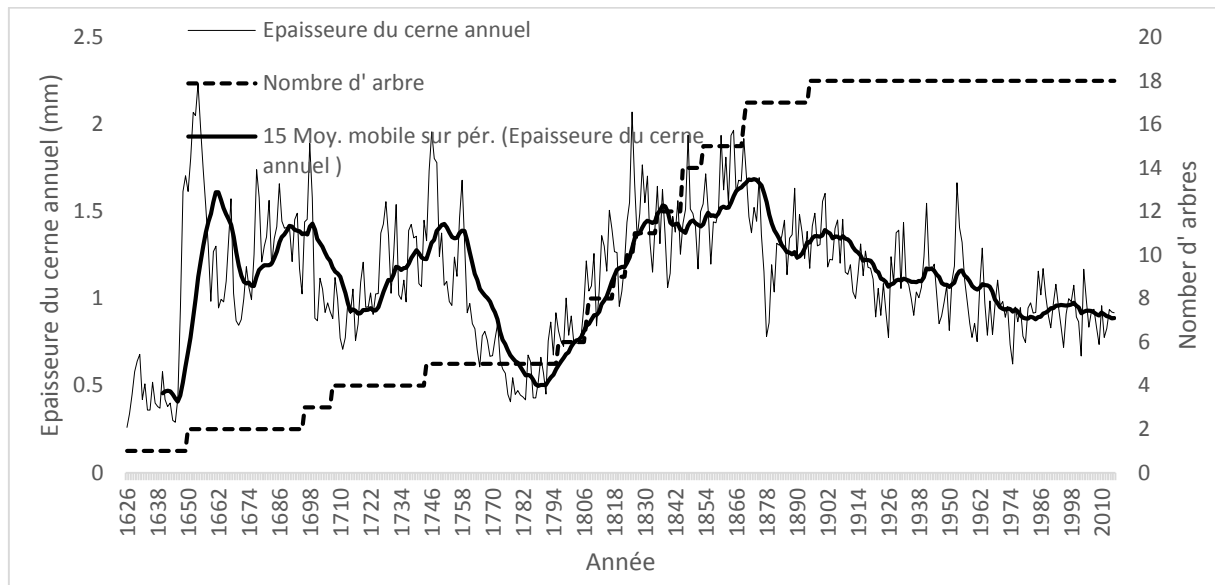


Figure 9. Courbe de croissance de la zénaie d'Issek exprimée en valeurs brutes des largeurs de cernes annuels. Les moyennes mobiles sont présentées sur la dernière année de chaque période.

2.2. Variabilité de la sensibilité moyenne

La figure 10 présente l'évolution de la sensibilité moyenne dans le temps. Les arbres sondés ont subi une haute variabilité de la sensibilité moyenne dont le pic est enregistré au début de la chronologie, en 1646. La courbe de la moyenne mobile de 15 ans décalés d'une année révèle plusieurs autres épisodes d'augmentation de la sensibilité moyenne des arbres sondés, dont ceux enregistrés à la fin du XVIII^e siècle, au cours de la décennie 1920, vers la deuxième moitié du XX^e siècle ainsi qu'à partir du début du XXI^e siècle. Des résultats similaires ont été avancés par plusieurs auteurs en Algérie (Slimani, 2014 ; Slimani *et al.*, 2014 ; Ourdani, 2017).

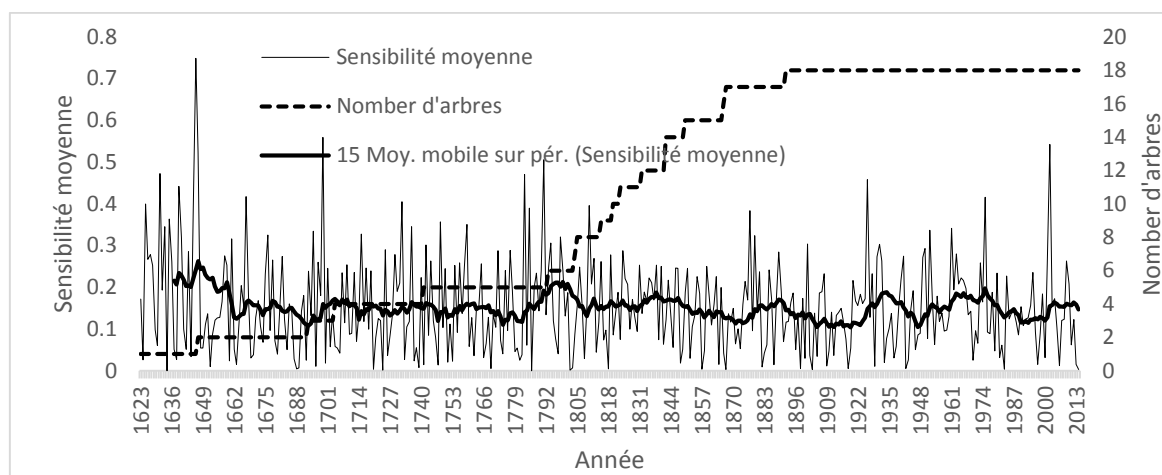


Figure 10. Evolution de la sensibilité moyenne des arbres sondés. Les moyennes mobiles sont calculées sur 15 ans décalés d'une année. Les valeurs sont présentées sur la dernière année de chaque période.

2.3. Standardisation

Les principales statistiques issues de la standardisation de la chronologie de référence sont consignées dans le (tableau 2).

Tableau 2. Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = Arstan).

Paramètres	Type de chronologie		
	STD	RES	ARS
Moyenne	0,98	0,99	0,98
Médiane	0,97	0,98	0,97
Sensibilité moyenne	0,15	0,18	0,15
Ecart type	0,22	0,16	0,19
Autocorrélation d'ordre 1	0,65	0,07	0,48

Les résultats montrent que les valeurs de la moyenne sont proches de celles de la médiane pour les trois chronologies standardisées. Ceci montre que la distribution de la donnée de l'indice de croissance n'est pas sensiblement désaxée. Par ailleurs, la chronologie résiduelle présente les meilleurs paramètres pour une approche dendroclimatique : la sensibilité moyenne y est la plus forte et l'écart-type le plus faible et c'est la seule chronologie qui présente un coefficient de corrélation d'ordre 1 presque nulle. Ce qui justifie le haut degré

d'élimination de la rémanence des conditions antérieures de croissance persistante dans les chronologies STD et ARS. Ainsi, les analyses ultérieures reposeront sur l'indice de croissance de la chronologie résiduelle.

Les caractéristiques principales de la chronologie maîtresse basée sur le seuil EPS de 0,85 sont consignées dans le tableau ci-après. L'intervalle commun de notre chronologie couvre une période de 148 ans allant de 1868 à 2015. La chronologie résiduelle présente les corrélations moyennes et la variance exprimée par le premier vecteur propre les plus élevées : la corrélation moyenne entre toutes les carottes et entre les arbres est de 0,37 et celle enregistrée entre les carottes d'un même arbre est de 0,60. La variance exprimée par le premier vecteur propre est de 39,90 %. Ces valeurs sont comparables à celles rapportées pour les peuplements de cèdre de l'Atlas du Djurdjura et du massif de Guetiane et largement inférieures à celles obtenues pour les massifs de l'Aurès et du Belezma (Slimani, 2014). Ceci montre que le signal climatique enregistré dans les cernes de croissance est plus fort au niveau de ces derniers massifs où le climat est plus contraignant, alors que notre site d'étude est situé dans un étage bioclimatique hyper-humide.

Tableau 3. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) sur l'intervalle commun des chronologies individuelles du site d'étude

Chronologie	Corrélation moyenne			Période commune	Nombre d'années	Nombre d'arbres	Variance du 1 ^{er} VP (%)
	Toutes les carottes	Entre arbres	Intra-arbres				
ARS	0,32	0,31	0,60	1868-2015	148	16	35,24
RES	0,37	0,37	0,60				39,90

La longueur totale de la chronologie résiduelle basée sur le seuil EPS continu de 0,85 est de 196 ans, couvrant la période 1820-2015 (tableau 4). La taille moyenne du segment de l'échantillon est supérieure à 200 ans. Avec un ajustement conservatif approprié, ces chronologies peuvent même être utilisées pour l'étude de la variabilité climatique de basses fréquences.

Tableau 4. Longueur de la série résiduelle au seuil d'EPS de 0,85.

Période totale	Taille moyenne du segment de l'échantillon (année)	EPS > 0,85	
		Période	Nombre d'arbres
1623-2015	206	1820-2015	10

2.4. Evolutions de l'indice de croissance

La chronologie résiduelle montre une variabilité interannuelle élevée de la croissance radiale (figure 11). Les valeurs de l'indice de croissance les plus fortes ont été enregistrées en 1649 (1,7), 1953 (1,5) et 1825 (1,4) et les valeurs les plus faibles à été obtenues en 1700 (0,5), 1632 (0,63) et 1878 (0,64).

Il est à signaler que l'évolution de l'indice de croissance ne montre pas une diminution sensible sur certaines périodes, notamment au cours des deux derniers siècles. Cette tendance est beaucoup plus mise en exergue par la courbe de la moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année, qui montre une variabilité de la croissance radiale relativement faible sur ce dernier intervalle de temps.

Notre chronologie est assez différente de celle du site voisin de la cédraie Takoucht (Ourdani, 2017) et les différences sont beaucoup plus marquées avec les chronologies des cédraies du Djurdjura et encore plus avec celles de la région des Aurès (Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014), qui affichent une tendance nette vers l'augmentation de la variabilité de la croissance radiale à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle, coïncidant avec une régression généralisée pour le patrimoine forestier mondial (Allen *et al.*, 2010 ; Latte *et al.*, 2015). Le dernier épisode de dépérissement forestier, observé en Algérie entre la fin du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle (Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014) ne semble pas avoir eu un impact significatif sur notre site d'étude où les chênes dépéris ou en processus de dépérissement sont surtout sujets à une forte pression anthropique, notamment aux incendies.

Ces différences entre notre chronologie et celles rapportées pour d'autres sites de Kabylie et pour la région des Aurès, pourraient s'expliquer, comme rapporté précédemment, par la sensibilité relativement faible vis-à-vis de la variabilité climatique du chêne zéen, un feuillu caducifolié, par rapport aux résineux ainsi que par le fait que, de par sa proximité à la

mer Méditerranée, notre site d'étude soit exposé directement aux flux humides.

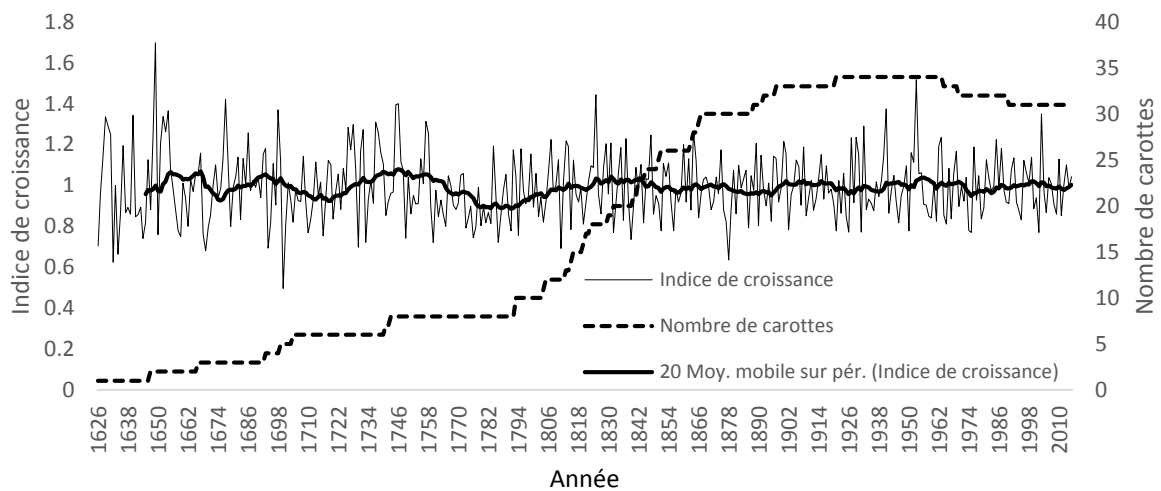


Figure 11. Chronologie maitresse résiduelle pour la zénaie du mont Issek. Les valeurs des moyennes mobiles de 20 ans décalés d'une année sont présentées sur la dernière année de chaque période.

Sur une période de 196 ans (1820-2015), l'indice de croissance a enregistré 46 années avec un cerne mince (23, 47 %) et 92 années avec un cerne épais (46,94 %). Ceci dénoter par la prédominance des conditions plutôt humides au niveau de notre milieu d'étude. La même tendance a été rapportée par Ourdani (2017) au niveau de la cédraie de Takoucht. Néanmoins, à Takoucht, la différence entre le nombre des cerne minces (53) et celui des cerne épais (63) n'est pas aussi importante. Il y a lieu tout de même de signaler que les périodes couvertes par nos chronologies respectives et les méthodes adoptées pour la détermination des cerne caractéristiques sont différentes. Le faible taux enregistré en cerne minces au niveau de notre site d'étude serait, comme cité précédemment, principalement dû à la relative faible sensibilité de nos arbres à la variabilité climatique. En plus du flux marin continu qui baigne les chênes carottés, l'effet versant (ubac) permet à la neige d'y persister plus tardivement (par endroit, parfois jusqu'en été) qu'au niveau du mont Takoucht, où le manteau neigeux est plus important, mais fond plus rapidement. Ainsi donc, en plus du fait que les feuillus soient moins sensibles à la variabilité climatique que les résineux, ces conditions d'humidité plus prolongées diminuerait davantage la sensibilité des arbres aux conditions de sécheresse. En effet, plusieurs cerne minces identifiés au niveau de plusieurs cédraies algériennes (Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014 ; Ourdani, 2017 ; Slimani *et al.*, 2021), à l'image de ceux signalés pour les années 2009, 1999 et 1997, n'ont pas été identifiés comme tels au sein de notre chênaie. Plus encore, à titre

d'exemple, l'année 2012, la plus arrosée sur la période retenue pour l'analyse de la relation cerne-climat (figure 9), a généré un cerne mince sur les cèdres de Takoucht. Ceci est dû au fait que les précipitations de cette année-là étaient très irrégulières et peu efficaces, car souvent orageuses et torrentielles et avec une pluviosité estivale importante. Cette pluviométrie annuelle importante n'a pas non plus généré un cerne moyen épais au sein de notre site d'étude. Mais les conditions d'humidité plus prolongées ont permis tout de même une utilisation plus efficace de l'eau, ce qui a conduit à la formation d'un cerne dont l'épaisseur est légèrement supérieure à la moyenne.

3. Relation cerne-climat

Les figures ci-après montrent l'évolution des variables climatiques considérées dans la présente étude sur la période 1978-2013.

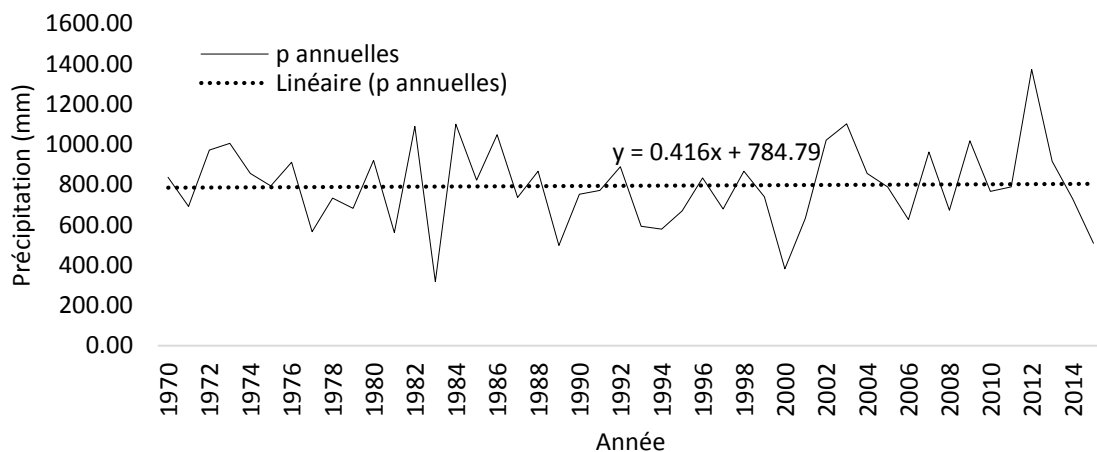


Figure 12. Evolution des précipitations annuelles de la station météorologique de Béjaïa sur la période 1978-2013.

Les précipitations annuelles ne montrent aucune évolution (diminution ou augmentation) significative (figure 12). L'examen de la donnée journalière révèle quant à elle une tendance vers une diminution du nombre de jours pluvieux et une augmentation du nombre de jours orageux. Au contraire, les températures moyennes affichent une augmentation significative (figure 13). Cette augmentation substantielle des températures est accompagnée d'une forte variabilité interannuelle des précipitations au cours des dernières années. Dans son analyse spatio-temporelle et de prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie, Boucherf (2010), met en exergue la tendance vers l'augmentation de la durée des périodes de sécheresse et l'intensité des précipitations extrêmes.

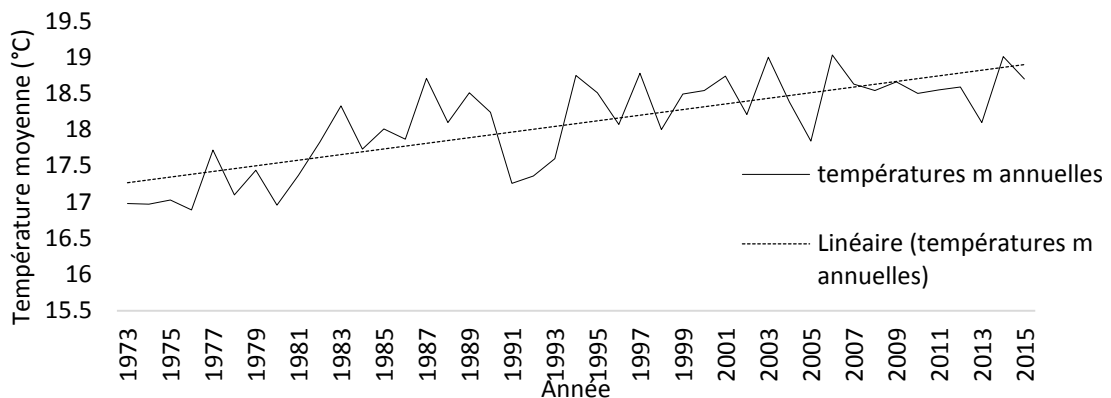


Figure 13. Evolution de la température moyenne de la station météorologique de Béjaïa sur la période 1978-2013.

L'allure de l'histogramme et le résultat du test de Lilliefors (Conover, 1980 in Meko *et al.*, 2011) suggèrent que l'indice de croissance suit une distribution normale (figure 14), une condition pour valider l'hypothèse de modélisation (H0 acceptée).

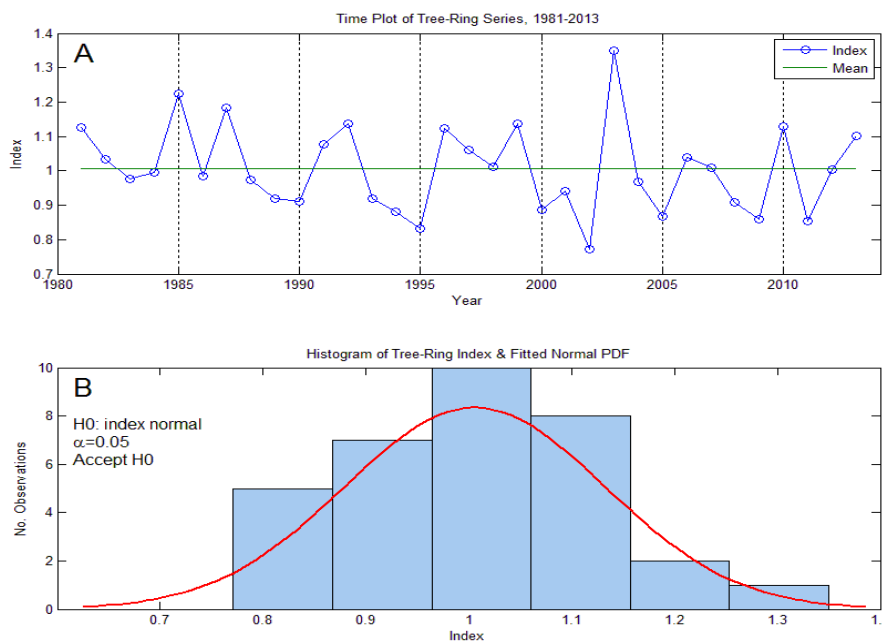


Figure 14. Fonction normale de densité de probabilité ajustée de l'indice de croissance et test de normalité de Lilliefors (Conover, 1980 in Meko *et al.*, 2011).

Les résultats de l'analyse des corrélations saisonnières, exécutée sous le programme Seascorr, impliquant l'indice de croissance et 24 répresseurs climatiques mensuels (12 valeurs

pour des précipitations et 12 valeurs de température moyenne) sur la période 1978-2013, sont présentés dans les figures 15 et 16 et les tableaux 5 et 6.

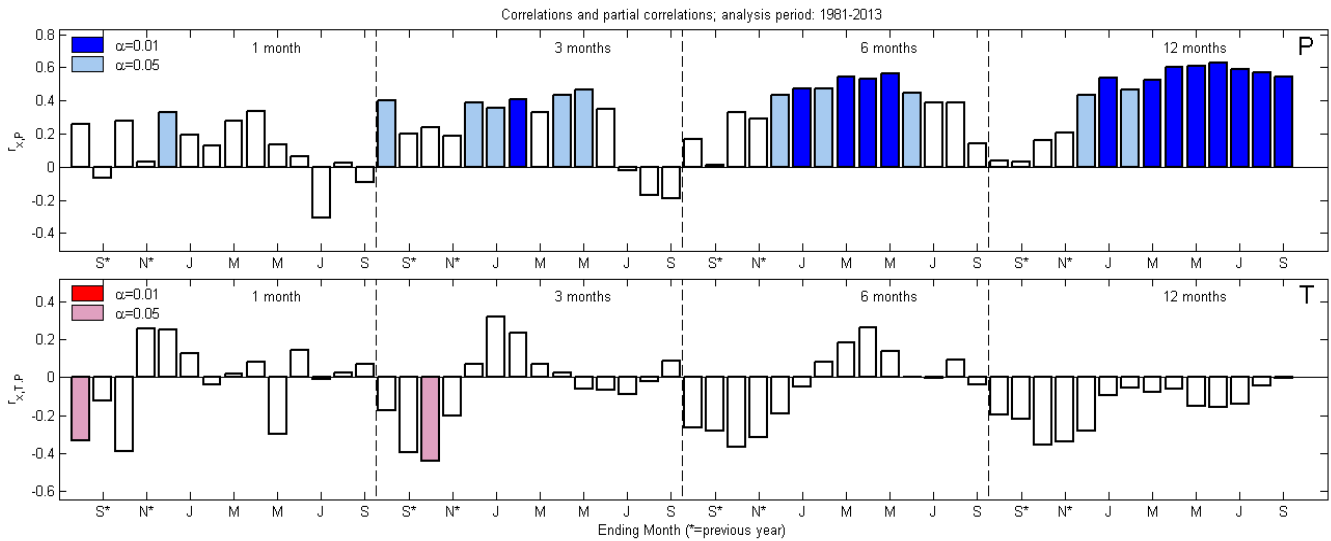


Figure 15. Corrélations entre l’indice de croissance et les variables climatiques saisonnières
 En haut les corrélations avec la variable climatique primaire, les précipitations(P).
 En bas les corrélations avec la variable climatique secondaire, la température (T).
 L’astérisque (*) indique les mois de l’année $t-1$.

L’examen de la figure 15 montre que la corrélation n’est positive et significative que pour le mois de décembre de l’année $t-1$ ($\alpha = 0,05$, $n = 36$). Les mois d’octobre de l’année $t-1$, de mars et d’avril de l’année t affichent aussi des corrélations positives appréciables, mais non significatives. L’importance de la précipitation du mois d’octobre pour la croissance radiale en Algérie a aussi été signalée par (Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014 ; Ourdani, 2017 ; Slimani *et al.*, 2021).

La corrélation cerne-climat est d’autant plus élevée et significative en considérant des périodes de plus en plus longues (figures 15 et 16 et tableaux 5 et 6). La période de trois mois la plus importante s’étale de mars à mai. Ceci dénote l’importance du cumul des précipitations printanières sur la croissance radiale. Les meilleures périodes allant de quatre à six mois incluent beaucoup plus les précipitations hivernales que celles de la fin du printemps. Des résultats différents sont signalés dans la région des Aurès (Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014), dans le Djurdjura (Slimani, 2014) et au mont Takoucht, qui est très proche de notre site d’étude (Slimani *et al.*, 2021). Ces auteurs rapportent également la meilleure période de trois mois entre mars et mai. Mais sur quatre mois, par exemple, les meilleures corrélations sont

obtenues en incluant le mois de juin ; pas les mois précédant le printemps. Ceci montre à quel point la réserve des précipitations hivernales est déterminante pour la croissance des arbres au niveau de notre site d'étude.

La température moyenne de la fin de la période estivale au début de l'automne de l'année $t-1$ est négativement corrélée avec la croissance radiale : seule le mois d'août est significatif ($\alpha = 0,05$, $n = 36$) (figure 15). Au contraire, une fin d'automne et un début d'hiver doux sont favorables à la croissance radiale. En outre, le mois de mai affiche une corrélation négative non significative mais assez élevée : une augmentation substantielle de la température, associée à une diminution de la précipitation durant cette période est traduite par une diminution importante de la croissance radiale. Un résultat similaire a été avancé par Slimani *et al.* (2021) au niveau de la cédraie de Takoucht.

L'effet du cumulatif des précipitations sur l'augmentation de la corrélation avec la croissance radiale n'est pas observé en considérant la température moyenne sur des périodes dépassant une fenêtre sur quatre mois. Aussi, aucune corrélation temporellement stable n'a été observée avec la température moyenne. C'est pour cela que la température est considérée dans nos analyses comme un facteur secondaire : la précipitation est le facteur le plus déterminant pour la croissance radiale.

Les diagrammes de dispersions entre les précipitations et l'indice de croissance sur plusieurs fenêtres de temps sont présentés dans la figure 16. Comme signalé précédemment, la corrélation est de plus en plus importante en considérant des périodes de temps de plus en plus élevées. Ceci se traduit par une relation de plus en plus linéaire, exprimée par une distribution plus compacte, avec des points plus proches de la droite de régression.

Dans le tableau 5 sont consignées les corrélations les plus élevées entre les précipitations et l'indice de croissance pour des périodes de 1, 3, 4, 6, 9 et 12 mois. La probabilité de ne pas dépasser est très élevée car la corrélation observée est supérieure à celle produite sur 1 000 simulations. Pris individuellement, c'est le mois d'avril qui affiche la corrélation la plus élevée, alors que seul de la précipitation du mois de décembre est corrélée significativement avec la croissance radiale (figure 15). En considérant des périodes de plus en plus importantes, le coefficient de corrélation augmente et le niveau de signification passe du seuil α de 0,05 à trois mois à celui de 0,01 à partir de quatre mois.

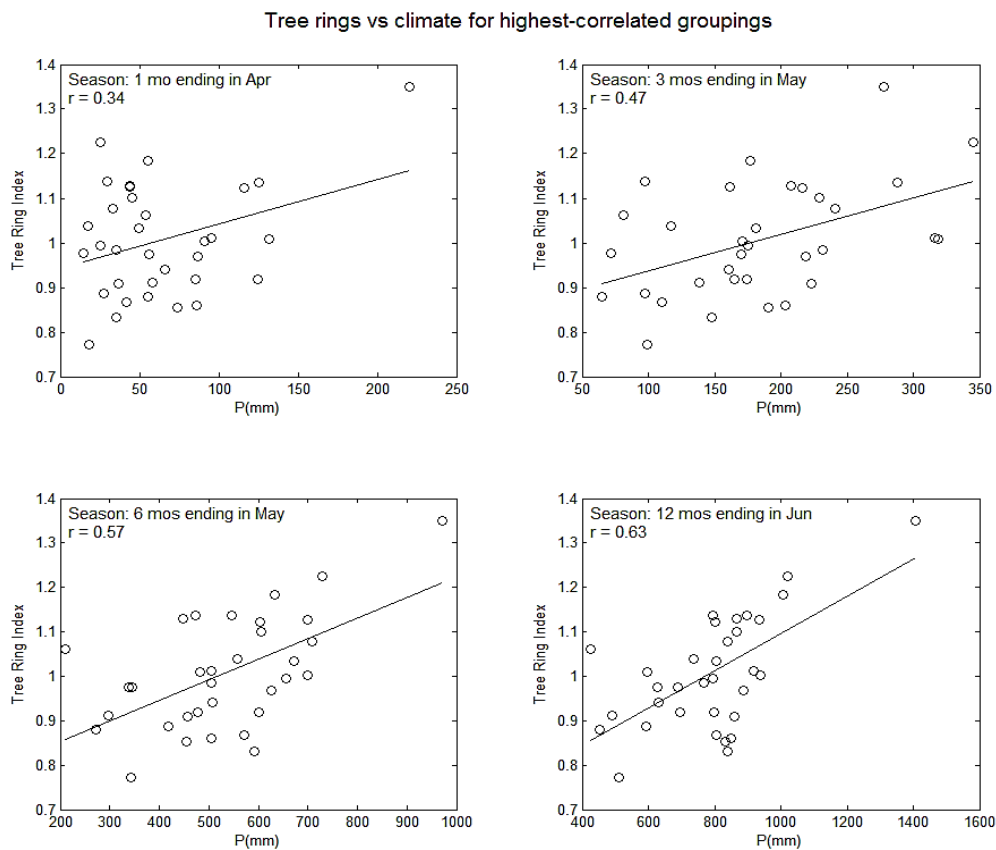


Figure 16. Diagrammes de dispersions entre les précipitations (P) et l'indice de croissance. Les meilleures corrélations sont illustrées pour les périodes d'un mois, de 3, de 6 et de 12 mois.

Tableau 5. Périodes présentant les plus fortes corrélations entre l'indice de croissance et les précipitations. r est le coefficient de corrélation de Pearson, * indique un seuil α de 0,05 et ** un seuil de 0,01.

Nombres de mois	Mois final	r
1	Avril	0,34
3	Mai	0,47*
4	Mars	0,48**
6	Mai	0,57**
9	Juin	0,61**
12	Juin	0,63**

Les résultats du test de stabilité temporelle des corrélations entre l'indice de croissance et les précipitations considérées sur plusieurs fenêtres sont consignés dans le tableau 6. Pris seul, le mois d'avril affiche une valeur p faible. Comme signalé précédemment, sa précipitation n'est pas corrélée significativement avec l'indice de croissance. Ceci est dû à la très faible corrélation enregistrée sur la première sous-période ($r = 0,03$, $n = 18$). Pour tous autres groupements (3, 4, 6, 9 et 12 mois), la valeur p est élevée. Il n'y a donc aucune différence significative entre les deux sous-périodes, ce qui confirme une bonne stabilité temporelle de la corrélation entre la précipitation et la croissance radiale sur la période totale (1978-2013).

Tableau 6. Stabilité temporelle de la corrélation entre l'indice de croissance et les précipitations de la première à la deuxième sous-période d'analyse.

Période (mois)	Corrélation ^a			Taille de l'échantillon ^b		Résultat du test ^c	
	Totale	Sous-période 1	Sous-période 2	N1	N2	ΔZ	p
Avril	0,34	0,03	0,55	18	18	-0,5782	0,133
Mars-Mai	0,47	0,61	0,39	18	18	0,2940	0,445
Déc*-Mars	0,48	0,41	0,59	18	18	-0,2315	0,548
Déc*-Mai	0,57	0,48	0,70	18	18	0,3403	0,377
Oct*Juin	0,61	0,64	0,64	18	18	-0,0022	0,996
Juil*Juin	0,63	0,60	0,71	18	18	-0,1894	0,623

L'astérisque (*) indique les mois de l'année $t-1$.

^a : Les corrélations linéaires de Pearson sont calculées pour la période totale (1978-2013), la première sous-période (1978-1995) et la deuxième sous-période (1996-2013).

^b : N1 et N2 sont le nombre d'années pour chaque sous-période.

^c : ΔZ est la différence entre les corrélations transformées des deux sous-périodes selon Panofsky et Brier (1968) et Snedecor et Cochran (1989) in Meko *et al.* (2011).

La dernière colonne présente la valeur p pour tester l'hypothèse nulle indiquant que les échantillons de corrélations des deux sous-périodes proviennent de la même population. Une différence significative entre les corrélations des deux sous-périodes est indiquée par une faible valeur de p (ex. $p < 0,05$).

Ces résultats nous permettent de proposer de tester la possibilité de reconstituer les précipitations pour la région d'étude sur ces périodes de trois à 12 mois. Des résultats différents ont été avancés par Slimani *et al.* (2021), qui signalent qu'une chronologie provenant de la cédraie voisine de Takoucht n'a permis cette reconstruction que sur quatre mois allant de mars à juin. La topographie ainsi que les caractères spécifiques aux deux essences forestières (un résineux et un feuillu caducifolié) seraient principalement à l'origine de ces différences.

Conclusion

Conclusion

Reposant sur l'approche dendrochronologique, la présente étude a été réalisée au niveau de la chênaie du mont Issek, située vers la partie centrale de la chaîne des Babors donnant sur la mer Méditerranée. L'objectif principal était d'analyser la réponse du chêne zéen à la variabilité climatique au niveau de la zone la plus pluvieuse en Algérie.

Les arbres sondés ont affiché une intercorrélation élevée et une sensibilité relativement faible. Ceci reflète l'homogénéité des conditions écologiques au sein de l'aire échantillonnée, caractérisée principalement par une humidité élevée. D'ailleurs le nombre des cernes épais y était de loin plus important que celui des cernes minces et la chronologie établie n'a enregistré aucun cerne absent.

L'analyse de la donnée climatique de la station météorologique de Béjaïa a montré une augmentation significative de la température moyenne annuelle, mais aucune évolution significative concernant la précipitation annuelle totale.

Le signal climatique enregistré dans les cernes de croissance des chênes carottés a été relativement faible. Néanmoins, l'analyse de la relation cerne-climat a généré des résultats intéressants.

Les résultats ont montré que la précipitation est le facteur qui contrôle principalement la croissance radiale au niveau de la région d'étude. Seul le mois de décembre précédant la saison de la croissance a affiché une corrélation significative avec l'indice de croissance. Ceci dit, des corrélations élevées mais non significatives ont été obtenues pour les mois d'octobre précédant la saison de la croissance ainsi que pour les mois de mars et d'avril de la saison de croissance. Aussi, la corrélation entre les précipitations et la croissance radiale augmente en considérant des périodes de plus en plus élevées. La période s'étalant de mars à mai a enregistré la meilleure corrélation pour les intervalles d'analyse sur trois mois. Cependant, quand on augmente encore l'intervalle de temps de l'analyse, les premières précipitations à s'y associer sont celles des mois qui précèdent directement le début de la période de croissance. Ceci dénote l'importance capitale des précipitations printanières et de la réserve constituée par la pluviosité hivernale pour le développement des arbres échantillonnés.

Enfin, cette étude fournit différentes périodes variant de trois à 12 mois sur lesquelles les corrélations entre les précipitations et l'indice de croissance sont significatives et temporellement stables. Il serait souhaitable que des modèles soient établis et testés dans le cadre de futures études pour éventuellement reconstituer les précipitations sur ces intervalles de temps pour la région de Béjaïa.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Achhal A, Akabli O, Barbero M, Benabid A, M'hirit A, Peyre C, Quezel P, Rivas-martinez S. 1980. A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecol. Médit.* Fasc. N°5, pp. 211-249.
- Alileche A. 2012. Etude du dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans la cédraie des Aurès : Belezma (Batna) et Chélia (Khenchela). Mémoire de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger. 106 pp.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Ameels M. 1989. Étude des propriétés technologiques et anatomiques de *Quercus canariensis* Willd, dans les massifs forestiers de l'Akfadou et Béni Ghobri en Algérie. Mémoire d'ingénieur. Université de Louvain Belgique. 127 pp.
- Ariche M. 1991. Contribution à l'étude de la production de chêne zéen dans la forêt de Guerrouch en fonction des facteurs stationels. Thèse d'ingénieur. INA, El-Harrach, Alger. 34 pp.
- Berrichi M. 1993. Contribution à l'étude de la production de la qualité du bois de trois espèces du genre *Quercus* : chêne vert (*Q. rotundifolia* Lamk.) ; chêne-liège (*Q. suber* L.) ; chêne zéen (*Q. faginea* Lamk.) : Cas des monts de Tlemcen. Thèse magister. INA, El-Harrach, Alger. 177 pp.
- Boucherf D. 2010. *Étude spatio-temporelle et prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie*. Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumediene, Algérie. 201 pp.
- Boudy P. 1950. Economie forestière nord-africaine. Tome 2 : monographies et traitements des essences forestières. Paris, France, Lasose, 878 pp.

- Boudy P. 1955. Economie forestière nord-africaine. Tome 4 : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Paris, France, Larose. 483 pp.
- Carnicer J, Barbeta A, Sperlic D, Coll M, Peñuelas J. 2013. Contrasting trait syndromes in angiosperms and conifers are associated with different responses of tree growth to temperature on a large scale. *Frontiers in Plant Science* 4, 409. doi: [10.3389/fpls.2013.00409](https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00409)
- Cook ER. 1985. A Time-Series Approach to Tree-Ring Standardization. Thèse de Doctorat. The University of Arizona, Tucson. 171 pp.
- Cook ER, Briffa KR. 1990. A comparison of some tree-ring standardization methods, *in*: *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, edited by Cook ER, Kairiukstis LA. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. pp. 153-162.
- Cook ER, Briffa KR, Shigatov S, Mazepa V, Jones PD. 1990. Data analysis. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, edited by Cook ER, Kairiukstis LA. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. pp. 98-162.
- Cook ER, Holmes RL. 1999. Program ARSTAN User's Manual. Tucson, AZ: Laboratory of Tree-Ring Research. The University of Arizona, Tucson. 81 pp.
- Delwaide A, Filion L. 2010. Échantillonnage et datation dendrochronologique, *in* : S. Payette et L. Filion. *La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. pp. 167-197.
- Douglass AE. 1939. Typical site of trees producing the best crossdating. *Tree Ring Research* 6 (2), 10-11.
- Douglass AE. 1945. Precision of ring dating in tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research Bulletin* 3, 1-21.
- Duplan L. 1952. La région de Bougie. Publ. XIXe Congr. Geol. Int. Monog. Région. 1 er série Algérie. 195 ; 17.

- Emberger L. 1939. Aperçu général sur la végétation du Maroc : Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc à 1/1500000. Veroff. Geobot. Inst, Ruble Zurich. 14. 40-157. Forest. Algérie. pp. 3-27.
- Fritts HC. 1976. Tree rings and climate. London, New York, San Francisco, Academic Press. 567 pp.
- Haddad A. 1990. Contribution à l'étude botanique et anatomique de quelques espèces de feuillus autochtones : *Populus tremula* L., *Fraxinus oxyphyla* Bieb., *Quercus mirbeckii* Dur. Thèse ingénieur. INA, El-Harrach, Algérie. 56 pp.
- Hamrani M. 1987. Contributions à l'étude de la variation saisonnière des teneurs en éléments minéraux (P, Fe, Mn et Cu) des feuilles de chêne (*Quercus suber*, *Quercus canariensis* et *afares*) dans le massif forestier de l'Akfadou. Mémoire de DES en biologie végétale. 56 pp.
- Hasnaoui B, Abbas C, Elghazel A, Yaccoubi W. 2004. Structure et architecture des chênes du nord-ouest tunisien. Présent et devenir. Annales de l'I.N.G.R.E.F. pp. 10-15.
- Holmes RL. 1983. A computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin 43, 69-78.
- Kherchouche D. 2013. Approches sylvicole et paléoécologique pour l'étude des facteurs de dépérissement et repartitions spatio-temporelle du cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica* Man.) de l'Aurès. Thèse doctorat en agronomie. Université Hadj-Lekhdar Batna. 90 pp.
- Kherchouche D, Kalla M, Gutiérrez EM, Attalah S, Bouzghaia M. 2012. Impact of droughts on *Cedrus atlantica* forests dieback in the Aurès (Algeria). J. Life Sci. 6, 1262-1269.
- Kherchouche D, Kalla M, Gutierrez 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.
- Lapie G, Maigre A. 1914. Flore forestière de l'Algérie. Ed, Orlhac, Paris. 360 pp

- Latte N, Lebourgeois F, Claessens H. 2015. Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia* 33, 69–77.
- Lebourgeois F, Mérian P. 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. Agro Paris Tech-ENGREF. 88 pp.
- Ledant JP. 1975. Essences forestiers algériennes (indigènes et exotiques). INA, EL-Harrach, Alger. 160 pp.
- Maire R. 1926. Carte phytocéologique de l'Algérie et de la Tunisie. Notice, Gouvernement générale de l'Algérie, service cartographique. Alger. 78 pp.
- Meko DM, Touchan R, Anchukaitis KJ. 2011. Seascorr: A MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Computers & Geosciences* 37, 1234-124.
- Messaoudene M. 1989. Dendroécologie et productivité de *Quercus afares* Pomel. et *Quercus canariensis* Willd. dans les massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni Ghobri en Algérie. Thèse de doctorat Ès sciences. Université Aix-Marseille III. 123 pp.
- Messaoudene M. 1996. Chêne zéen et chêne afarès. La forêt algérienne (N°1 fév.-mars), INRF, Bainem, Alger. pp. 18-25.
- Messaoudene M, Tessier L. 1991. Croissance radiale de *Quercus canariensis* Willd. et *Quercus afares* Pomel. en Kabylie Algérie. *Ecologia Mediterranea* 17, 119-133.
- Messaoudene M, Tessier L. 1997. Relations cerne-climat dans des peuplements de *Quercus afares* Willd. et *Quercus canariensis* Pomel. en Algérie. *Annales des Sciences forestières* 54, 347–358
- Messaoudene M, Laribi M, Derridj A. 2007. Étude de la diversité floristique de la forêt de l'Akfadou (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques* 291 (1), 75-81.
- Nicault A, Bégin Y, Guiot J. 2010. Standardisation des séries dendrochronologiques. Pages 199-228 in S Payette et L Filion. *La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.

- Obert D. 1974. Phases tectoniques mésozoïques d'âge anté-cénomarien dans les Babors (Tell nord-sétifien, Algérie). Bull. Soc. Géol. Fr. 16, 171-175.
- Obert D. 1984. Importance de la paléotectonique dans l'orogénèse tellienne des Babors. Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique 25 (2), 99-117.
- Ourdani K. 2017. La réponse de la cédraie de Takoucht (Bejaïa) à la variabilité climatique. Mémoire de Master en Écologie Forestière. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 50 pp.
- Ourlis S. 2001. Ajustement de modèles entre les variables dendrométriques du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) : cas du canton de Tizi-Oufellah (forêt des Béni-Ghobri). Mémoire d'ingénieur. Université Tizi-Ouzou. 42 pp.
- Pinon J. 1990. Le flétrissement américain des chênes. Évaluation des risques et prévention. PP. 186-190.
- Quézel P, Bonin G. 1980. Les forêts feuillues du pourtour méditerranéen : constitution, écologie, situation actuelle et perspectives. Revue Forestière Française 32 (3), 253-268.
- Quézel P, Santa S. 1962. Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales. Ed. C.N.R.S, Paris. 1170 pp.
- Rabhi K. 2011. Ajustement de modèles hauteur-circonférence-âge pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou (Tizi Ouzou) ; effet de la densité et de la station. Thèse de magister en foresterie. Gestion et conservation des écosystèmes. Université de Tlemcen. 67 pp.
- Ravilly F. 1971. Sur le pouvoir lignivore de quelques corticiés. Bull. Soc. Mycol. France, T.87, 555-600.
- Ruiz-Benito P, Ratcliffe S, Zavala MA, Martínez-Vilalta J, Vila-Cabrera A, Lloret F. 2017. Climate- and successional-related changes in functional composition of European forests are strongly driven by tree mortality. Glob. Change Biol. 23 (10), 4162-4176. <https://doi.org/10.1111/gcb.13728>

- Safar W. 1994. Contribution à l'étude dendroécologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) dans une région semi-aride d'Algérie : l'Atlas Saharien (Ouled Nail-Aurès-Hodna). Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille III. 215 pp.
- Sarmoum M., Navarro-Cerrillo R.M., Guibal F., Abdoun F. (2018). Structure, tree growth and dynamics of *Cedrus atlantica* Manetti forests in Theniet El Had National Park (N-W Algeria). Open Journal of Ecology 8, 432-446. <https://doi.org/10.4236/oje.2018.88026>
- Schulman E. 1954. Longevity under adversity in conifers. Science, 119 (3091), 396-399. [DOI: 10.1126/science.119.3091.396](https://doi.org/10.1126/science.119.3091.396)
- Seltzer P. 1946. Le climat d'Algérie. Université d'Alger. Institut de Météorologie et de Physique du Globe. 219 pp.
- Slimani S. 2014. Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'histoire des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie. Thèse de doctorat en science biologiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 171 pp.
- Slimani S, Derridj A, Gutiérrez E. 2014. Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the massif of Guetiane (Algeria). Forest systems 23 (3), 448-460. <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-05175>
- Slimani S, Kherchouche D, Bekdouche F, Gutiérrez E. 2021. Tree-ring reconstruction of March-June precipitation from the Atlas cedar forest of Mount Takoucht, Béjaïa (northern Algeria). Forest Systems 30 (3), 011, 12p. <https://doi.org/10.5424/fs/2021303-18111>
- Stewart P. 1974. Cours de sylviculture. I.N.A, El-Harrach, Alger. 74 pp.
- Stokes MA, Smiley TL. 1996. An Introduction to Tree-ring Dating. The University of Arizona, Tucson Press, Tucson, Arizona. 73 pp.
- Tafer M. 2000. Contribution à l'étude de la variabilité de la qualité du bois de *Quercus canariensis* Willd. Dans la forêt des Beni-Ghobri. Mémoire de Magister. Université de Tizi Ouzou. 143 pp.

- Taibi A. 2012. Contribution à une étude descriptive des peuplements à chêne zéen (*Quercus faginea* Lamk.) dans les forêts de Zariffet et Hafir (Wilaya de Tlemcen). Université de Tlemcen. 70 pp.
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Attalah S, Baisan C, Aloui A. 2008. Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical Research Letters* 35, L13705. doi:10.1029/2008GL034264.
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Kerchouche D, Slimani S, Ilmen R, Hasnaoui F, Guibal F, Camarero JJ, Sánchez-Salguero R *et al.*, 2017. Climate controls on tree growth in the Western Mediterranean. *The Holocene* 1-14. <https://doi.org/10.1177/0959683617693901>
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Sabir M, Attalah S, Aloui A. 2010. Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim. Dyn.* doi : 10.1007: S0038260106080464.
- Touzouirt B. 2018. Modélisation de l'aire potentielle de chêne zéen *Quercus canariensis* en Algérie à l'aide de MaxEnt. Mémoire de Master en Écologie Forestière. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 34 pp.
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 201-213.
- Yamaguchi DK, Brunstein FC. 1991. Special sanding films and sandpapers for surfacing narrow-ring increment cores. *Tree-Ring Bulletin* 51, 43-46.
- Zulueta J .1980. Recherche en vue de l'amélioration des pâturages dans des forets de *Quercus pyrenaica* et *Quercus faginea* en Espagne. Dossier pâturage en forêt. pp.58-72.

Annexes

Tableau III : Valeurs mensuelles des températures moyennes (°C) de la station de Bejaia (1978 -2015).

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC	Moyenne annuelle
1973	11,35	10,65	10,75	13,95	18,15	21,6	23,85	24,45	23,05	18,95	14,4	12,65	16,98
1974	12,4	12	13,05	13,45	17,8	20,8	22,75	23,65	23,6	17,35	15,5	11,4	16,98
1975	11,9	11,8	12,55	13,55	16,45	19,6	23,95	25	23,75	18,65	14,7	12,55	17,04
1976	10,95	11,8	12,4	14,2	17,35	20,5	23,55	23,7	22,6	18,5	13,3	13,9	16,89
1977	13	14,05	14,7	15,25	17,4	20,3	22,65	22,7	21,15	21,45	16	14	17,72
1978	10,55	14,1	13,25	14,1	16,9	20,5	23,6	24,05	21,8	17,65	13,8	15	17,11
1979	14,4	13,75	13,25	13,25	17,15	21,9	23,95	24,4	21,65	19,75	13,35	12,5	17,44
1980	11,65	12,45	13,25	13,25	17	20,5	22,4	25	23,25	18,5	16,25	10,1	16,97
1981	10,2	11,5	14,7	15,3	18,3	20,85	21,9	23,4	23,1	19,25	15,15	14,8	17,37
1982	12,75	11,65	13,1	14,55	18,05	22,85	27,05	24,85	22,95	19,2	15,75	11,25	17,83
1983	10,6	10,9	13,65	16,1	18,65	22,35	27,15	24,4	24,4	20,75	17,9	13,15	18,33
1984	12,15	11,1	12,45	19,2	16,55	20,55	25,45	23,95	22,85	18,55	17,5	12,4	17,7
1985	10,5	14,7	12,4	15,95	17,7	21,85	24,8	24,4	22,7	20,15	17,65	13,4	18,02
1986	11,7	12,4	13,05	15	19,2	21,25	23,85	26,3	23,6	20,7	15,55	11,95	17,88
1987	13,55	12,2	12,9	16,1	17,05	21,45	25,05	26,65	26,15	22,9	16,1	14,5	18,72
1988	14,05	11,7	13,2	15,4	18,4	21,5	25,15	26,4	22,15	21,9	16,25	11,2	18,11
1989	11	12,55	14,4	15,3	17,6	21,5	25,1	26,65	24,3	20,05	17,15	16,6	18,52
1990	12	14,2	14,55	14,55	18,4	22,2	24,25	24,5	25,6	21,7	16,15	10,8	18,24
1991	10,85	10,8	15	13,55	15,8	21,35	24,35	25,65	24,95	18,95	14,95	11	17,27
1992	10,55	11,5	12,8	14,7	17,5	20	23,25	24,9	24	19,55	16,45	13,2	17,37
1993	10,8	10,75	12,7	15,15	18,9	22,1	24,75	25,65	22,45	20,25	14,8	12,95	17,60
1994	12	12,8	14,15	14,2	19,7	21,95	25,35	28,6	24,85	21	17,15	13,2	18,74
1995	11,75	14,5	13,7	14,55	19,65	21,45	24,35	25,7	22,9	20,85	17,25	15,55	18,52
1996	14,45	11,9	14,3	16	17,9	21,35	24,25	25,25	21,7	18,35	16,55	14,85	18,07
1997	13,75	12,95	13,15	15,45	19,95	23,65	24,2	25,8	24,05	20,85	17,65	13,95	18,78
1998	13	13,4	13,8	16,15	18,15	22,75	24,2	25,15	24,1	18,55	15,05	11,75	18
1999	11,9	10,15	14,25	15,05	20,2	22,95	24,6	27,45	24,7	23,1	15,05	12,5	18,49
2000	10,15	12,6	14,05	16,9	19,4	21,75	25,8	26,7	23,7	19,7	17	14,74	18,54
2001	13,65	12,3	17,5	15,6	17,65	23,35	24,8	25,9	23,45	23,5	15,65	11,6	18,75
2002	11,75	12,4	14,4	15,65	18,4	21,7	24,25	24,8	23,15	20,45	16,9	14,7	18,21
2003	11,9	10,85	14,4	15,75	18,2	25	29,1	28,35	24	21,15	16,95	12,3	19
2004	12,25	13,6	13,85	15,2	17,3	21,35	25,1	26,9	24,25	22,85	14,95	12,95	18,38
2005	9,25	9,75	13,25	16,1	19,4	22,8	25,6	25,15	23,25	21,3	15,95	12,3	17,84
2006	11	11,75	14,8	18	20,8	22,8	25,4	25,4	23,65	22,5	18,65	13,7	19,04

2007	13,35	14,7	13,7	17,1	19,85	22,7	24,75	26,65	23,2	20,25	15,3	12,1	18,64
2008	12,5	14	14	16,5	19	22	26	26	23,5	21	15,5	12,5	18,54
2009	12	11,5	13	15	20	23	27	26,5	23,5	20	17,5	15	18,67
2010	12,5	14	14,5	17	18	21,5	25	25,5	23,5	20,5	16	14	18,5
2011	12,3	11,6	14,2	17	19	21,55	25,8	25,85	24,25	20,8	17,05	13,3	18,56
2012	11,7	8,45	13,75	16,6	18,8	24,35	26,1	27,45	23,5	21,25	17,7	13,45	18,59
2013	12,4	10,7	15,35	16	17,85	20,45	24,75	24,65	23,4	23,15	15,45	13,15	18,11
2014	13,9	13,85	13,05	16,9	18,05	22,4	24,1	25,8	25,9	22,05	18,75	13,4	19,01
2015	11,9	11,45	13,6	16,6	19,75	22,2	26	26,75	24,45	21,3	16,25	14,2	18,70

Tableau IV : Valeurs mensuelles des précipitations (mm) pour la station de Bejaia (1970-2016).

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC	Total annuel
1970	30,90	56,00	130,70	215,70	67,60	1,20	12,40	0,00	1,00	186,70	2,80	131,70	836,70
1971	123,00	50,50	107,10	30,20	25,80	0,10	5,20	0,00	104,00	123,90	71,10	52,20	693,10
1972	155,90	67,40	93,30	86,80	89,70	25,10	4,40	16,50	106,00	76,40	20,50	230,00	972,00
1973	166,90	230,00	123,60	33,70	0,30	42,80	0,30	1,90	70,90	83,20	78,50	173,30	1005,40
1974	21,80	163,50	161,10	105,00	2,20	7,10	8,30	1,70	75,10	227,00	43,60	40,30	856,70
1975	52,70	90,70	115,30	27,80	89,40	17,70	0,00	37,00	39,80	9,30	229,00	85,60	794,30
1976	131,80	140,80	66,10	72,10	47,10	30,50	47,30	19,20	47,30	99,70	138,00	72,40	912,30
1977	92,30	19,40	38,60	109,30	38,50	6,60	0,40	5,70	8,10	27,70	205,00	14,70	566,30
1978	124,50	78,90	144,10	111,90	50,80	1,90	0,10	0,00	15,20	90,50	106,00	10,10	734,00
1979	49,30	115,80	72,80	110,50	21,60	17,20	18,70	47,00	73,70	41,80	100,00	13,90	682,30
1980	48,30	26,50	118,30	94,30	35,10	1,70	1,30	4,00	3,30	42,90	159,00	386,20	920,90
1981	51,40	100,00	96,20	43,90	21,20	24,00	2,10	27,90	3,20	48,70	52,30	90,40	561,30
1982	299,10	100,20	57,70	49,40	74,40	0,80	0,40	39,10	23,60	107,70	112,00	226,40	1090,80
1983	11,20	35,20	44,10	14,60	13,00	0,10	1,80	10,20	3,50	57,00	59,00	69,50	319,20
1984	221,40	189,70	90,00	25,50	60,00	8,90	0,60	3,60	17,40	262,50	6,00	215,00	1100,60
1985	129,70	38,80	248,30	25,30	72,10	1,30	0,70	7,30	79,60	52,00	101,00	66,90	823,00
1986	125,50	81,00	183,40	35,60	12,50	22,10	4,50	4,70	37,30	184,10	136,00	222,20	1048,90
1987	72,80	161,90	74,20	40,90	47,30	5,70	3,60	2,10	26,90	52,50	216,00	33,20	737,10
1988	39,90	94,70	69,20	56,30	44,90	50,20	0,00	1,80	61,10	0,90	242,00	206,80	867,80
1989	91,80	13,70	34,10	124,40	6,10	16,40	2,00	12,30	49,10	48,50	65,70	33,80	497,90

Annexes

1990	123,20	1,02	43,70	58,40	85,80	16,90	8,70	2,50	3,40	41,40	72,20	295,50	752,72
1991	76,90	94,90	168,50	33,50	38,70	2,40	0,40	8,00	80,10	188,10	36,90	44,10	772,50
1992	160,60	53,30	115,10	125,00	47,60	37,00	3,40	0,00	3,10	31,80	52,50	260,40	889,80
1993	78,60	88,00	42,40	85,50	46,20	4,50	0,00	0,00	59,50	51,30	66,20	71,00	593,20
1994	55,30	81,70	0,80	55,60	8,40	2,10	0,20	0,60	133,00	73,60	18,20	149,40	578,90
1995	238,40	55,80	95,70	35,60	1,80	22,80	0,30	20,00	71,40	15,90	51,50	60,80	670,00
1996	105,70	220,40	58,90	118,30	43,90	38,80	9,60	4,10	37,60	47,00	95,10	54,00	833,40
1997	50,10	24,50	16,30	53,90	11,30	22,20	2,40	18,04	58,20	222,10	108,00	93,00	680,04
1998	16,10	79,60	60,70	95,40	160,30	3,30	0,00	10,42	45,90	81,40	185,00	129,30	867,42
1999	125,80	119,90	52,60	29,80	14,70	1,40	0,60	2,70	47,80	24,40	93,40	227,10	740,20
2000	72,90	21,70	13,90	27,30	53,70	5,30	1,40	0,00	13,00	76,50	30,90	65,50	382,10
2001	212,00	70,20	9,10	65,90	37,10	0,00	0,00	13,71	47,30	3,05	104,00	70,90	633,26
2002	68,80	103,60	57,50	18,10	23,50	0,00	116,08	28,10	61,70	36,10	193,00	315,00	1021,48
2003	310,00	69,00	30,70	220,60	26,50	1,00	2,20	1,60	114,00	75,50	45,60	205,50	1102,20
2004	147,90	54,60	86,90	110,40	69,90	26,00	0,00	5,00	18,80	30,40	178,00	128,40	856,30
2005	165,50	167,50	60,40	41,90	7,70	0,00	0,40	6,10	28,20	31,70	107,00	172,40	788,80
2006	126,70	141,00	46,50	17,30	53,30	4,80	1,02	34,55	35,30	21,30	13,30	132,70	627,77
2007	9,30	20,40	175,10	132,00	12,10	9,90	2,60	6,70	63,40	149,00	175,00	207,00	962,50
2008	7,00	20,00	120,00	37,00	66,00	7,00	3,00	4,00	144,00	61,00	131,00	73,00	673,00
2009	237,00	66,00	63,00	86,00	54,00	1,00	4,00	15,00	190,00	40,00	129,00	133,00	1018,00
2010	53,00	55,00	107,00	44,00	57,00	38,00	1,00	6,00	39,00	135,00	162,00	70,00	767,00
2011	52,58	138,68	50,29	68,82	87,89	36,07	0,25	0,00	7,11	128,27	100,08	118,87	788,91
2012	89,90	323,36	74,94	198,39	7,36	95,51	1,02	2,03	333,76	83,56	106,43	57,15	1373,41
2013	130,80	179,82	78,23	46,23	83,56	3,05	10,92	69,86	44,68	34,79	182,88	52,31	917,13
2014	84,56	56,64	138,17	17,27	10,16	66,8	0,76	1,27	6,1	76,21	9,15	262,89	729,98
2015	135,12	155,43	70,86	3,05	19,30	1,78	0,00	10,16	20,58	41,65	51,56	0,00	509,49

Liste des cernes minces

1623-d	1723-d	1820e	1958--d
1626j	1730-e	1821-e	1959f
1627-d	1733-d	1822--c	1960--c
1634-d	1734-d	1833-d	1961f
1635-d	1735--c	1839f	1965-d
1638--c	1736f	1840e	1967--c
1639--c	1742-d	1844--c	1974-e
1642--c	1743--c	1850--c	1975i
1643--c	1744-d	1851g	1979-d
1644i	1749--c	1856f	1980-e
1645i	1751-d	1858--c	1990--c
1646--c	1752--c	1859--c	1994--c
1647k	1753-e	1872--c	1995g
1659f	1754-e	1878m	2002h
1662g	1764-d	1879i	2009-e
1669g	1765h	1881-d	2011--d
1670h	1776-d	1886--c	
1671h	1777-e	1895f	
1674--c	1779--c	1902-d	
1675-e	1781--c	1912--d	
1694--c	1782--c	1913--c	
1695-d	1783-e	1921f	
1700g	1786f	1923-d	
1701-d	1787-e	1925-d	
1710-d	1791g	1926i	
1711f	1794-d	1936-d	
1716-e	1804e	1938--c	
1717--c	1805-e	1946-e	
1720-d	1811h	1947-d	
1721--c	1812-d	1950f	

Listes des cernes épais

1628-----B	1692-----C	1758-----J	1825-----H
1629-----H	1693-----D	1759-----D	1826-----C
1630-----J	1696-----B	1761-----A	1828-----A
1631-----K	1698-----I	1767-----B	1829-----D
1633-----D	1699-----G	1768-----A	1831-----E
1636-----D	1705-----A	1771-----E	1835-----E
1640-----F	1708-----E	1772-----H	1837-----E
1649-----D	1709-----C	1773-----B	1838-----A
1651-----B	1713-----B	1775-----A	1843-----B
1652-----G	1714-----A	1778-----B	1846-----A
1653-----G	1715-----D	1784-----G	1847-----F
1654-----I	1718-----B	1785-----D	1848-----A
1655-----G	1719-----D	1789-----D	1853-----A
1656-----E	1722-----A	1792-----D	1854-----D
1657-----B	1726-----D	1793-----E	1860-----D
1665-----A	1727-----E	1795-----D	1861-----A
1666-----D	1728-----H	1796-----B	1862-----D
1667-----G	1729-----D	1797-----A	1864-----E
1676-----A	1731-----B	1799-----E	1865-----F
1677-----K	1732-----F	1800-----A	1868-----A
1678-----G	1737-----B	1801-----C	1869-----B
1680-----A	1738-----C	1807-----D	1870-----B
1681-----B	1739-----D	1808-----A	1875-----F
1682-----E	1740-----C	1809-----A	1876-----A
1685-----A	1745-----D	1810-----D	1882-----A
1686-----F	1746-----G	1813-----C	1883-----B
1687-----A	1747-----E	1814-----F	1884-----C
1688-----B	1748-----C	1816-----B	1885-----D
1689-----A	1755-----A	1817-----A	1887-----A
1690-----B	1757-----F	1824-----A	1888-----A
			1889-----F

1891-----C	1963-----F
1892-----A	1966-----B
1896-----A	1968-----A
1897-----B	1969-----E
1900-----E	1970-----A
1901-----E	1971-----B
1905-----B	1973-----C
1906-----C	1976-----B
1908-----D	1978-----B
1911-----A	1981-----A
1915-----D	1982-----A
1917-----D	1985-----E
1918-----B	1986-----B
1919-----B	1987-----F
1924-----A	1988-----B
1927-----C	1991-----A
1929-----E	1992-----C
1930-----F	1997-----B
1932-----F	1998-----A
1933-----A	1999-----D
1940-----C	2003-----F
1941-----I	2004-----C
1942-----A	2006-----A
1944-----A	2007-----A
1949-----A	2010-----C
1951-----A	2013-----C
1952-----B	2014-----A
1953-----I	2015-----B
1954-----F	
1955-----E	
1956-----A	
1962-----B	