

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département d'Écologie et Environnement



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master en Écologie et
Environnement
Spécialité : Biodiversité et Environnement

Thème

**Réponse du cèdre de l'Atlas, du chêne zéen
et du chêne afarès des Babors occidentaux (Béjaia) à la
variabilité climatique**

Présenté par : ZIDANE Yanis
ZALOUK Rabah

Devant le jury :

RABHI Khellaf	Professeur	UMMTO	Président
SLIMANI Saïd	Maître de conférences classe A	UMMTO	Promoteur
CHIKHAOUI Zakia	Maître assistante classe B	UMMTO	Examinatrice

Soutenu le 22/09/2024

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout-Puissant, le Miséricordieux, de nous avoir accordé la santé, la patience et la persévérance pour mener à bien ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre promoteur Monsieur Slimani Saïd, pour sa générosité, sa patience, ses encouragements constants, et surtout pour ses conseils précieux qui ont largement contribué à la réalisation de ce travail. Son soutien moral et son expertise ont été d'une aide inestimable.

Nous souhaitons aussi exprimer notre gratitude aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail, et dont les remarques et suggestions seront des sources d'enrichissement pour l'avenir.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos maîtres et enseignants de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont transmis tout au long de notre cursus, et pour leur engagement inlassable à notre égard.

Nos remerciements vont également à nos parents, pour leur soutien indéfectible, tant moral que financier, sans lequel ce projet n'aurait pu aboutir. Leur confiance en nous a été une source de motivation constante.

Enfin, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, que ce soit par leur aide technique, leurs conseils, ou leur soutien amical. Leur présence et leurs encouragements ont été précieux tout au long de ce parcours.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail, avec tout mon amour, mon respect et ma profonde reconnaissance, à mes parents. Vous avez été mon pilier, mon soutien infaillible, et c'est grâce à votre sacrifice, vos encouragements et votre affection que j'ai pu mener ce projet à bien. Quoi que je fasse ou dise, je ne pourrai jamais vous remercier suffisamment pour tout ce que vous avez fait pour moi. J'implore le Tout-Puissant de vous accorder une longue vie, pleine de santé, de bonheur et de sérénité. Que Dieu vous préserve et vous garde près de nous.

À mes sœurs, mes oncles et mes tantes, ainsi qu'à tous les membres de ma famille qui m'ont constamment encouragé et soutenu durant ces années d'études. Votre présence à mes côtés m'a été d'un grand réconfort.

À mon binôme, Rabah, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables. Merci pour ton soutien moral, ta patience et ta compréhension tout au long de ce projet. Ta présence a grandement facilité cette aventure.

À tous mes amis, qui ont été là pour moi dans les bons comme dans les moments plus difficiles, je vous suis infiniment reconnaissant pour votre amitié et vos encouragements.

Enfin, je dédie ce travail à vous, chers lecteurs, en espérant qu'il saura vous apporter un éclairage utile et enrichissant.

YANIS

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, qui ont toujours été un modèle de patience, de dévouement et de soutien inconditionnel. Votre amour et vos encouragements constants m'ont donné la force de surmonter chaque défi rencontré au cours de ce parcours. Que Dieu vous accorde longue vie, santé et bonheur, et qu'Il continue à vous protéger et vous guider.

À ma famille, mes sœurs, je vous exprime ma gratitude pour votre soutien indéfectible et vos encouragements constants tout au long de mes études. Vos mots et votre présence m'ont porté dans les moments les plus difficiles.

Je tiens également à dédier ce travail à mon binôme Yanis, pour tous les moments partagés, ton soutien moral et ton amitié sincère. Merci pour ta patience, ta compréhension et ta collaboration tout au long de ce projet. Ce fut un véritable plaisir de travailler ensemble.

À mes amis, pour leur présence à mes côtés et pour tous les instants de joie, d'amitié et de partage qui ont marqué ces années d'études. Votre soutien m'a été précieux, et je ne vous en remercierai jamais assez.

Enfin, je dédie ce mémoire à vous, chers lecteurs, en espérant qu'il puisse répondre à vos attentes et vous apporter une meilleure compréhension du sujet abordé.

RABAH

Résumé

Cette étude traite de la réponse de trois essences forestières des Babors occidentaux (Béjaïa, Algérie) à la variabilité climatique. L'approche dendrochronologique est adoptée pour détecter la force du signal climatique enregistré dans les cernes de croissance d'un résineux (cèdre de l'Atlas) et de deux feuillus caducifoliés (chêne zéen et chêne afarès), d'examiner la sensibilité de chacune des espèces à la variabilité climatique et d'analyser la relation cerne-climat afin de proposer des périodes de l'année sur lesquelles la reconstitution des précipitations passées est possible. Vingt arbres sains ont été carottés à la tarière de Pressler au niveau de chacun des peuplements retenus et une chronologie de cernes croissance a été établie pour chacune des trois espèces considérées. Les résultats obtenus mettent en évidence la grande fluctuation de la croissance radiale des essences forestières étudiées au cours des quatre derniers siècles, reflétant la grande variabilité climatique enregistrée au cours de cette période au niveau de la région d'étude. Par ailleurs, une recrudescence des événements extrêmes, aussi bien humides que secs, a été identifiée à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle, témoignant d'une tendance vers un climat de plus en plus imprévisible. La différence entre les sensibilités des espèces sondées aux changements climatiques est remarquable : la plus forte sensibilité moyenne a été enregistrée par le cèdre de l'Atlas et la plus faible par le chêne afarès. Ainsi, plusieurs propositions pour l'établissement de modèles de reconstitution dendroclimatique des précipitations sont obtenues avec les chronologies du cèdre de l'Atlas et du chêne zéen, alors que le chêne afarès fournit peu d'alternatives permettant d'établir un modèle statistique robuste. Ces résultats présentent des éléments pertinents à prendre en considération dans le cadre de la gestion durable des écosystèmes forestiers ainsi que de la ressource en eau dans la région d'étude dans le contexte actuel des changements climatiques.

Mots-clés : dendrochronologie, variabilité climatique, *Cedrus atlantica*, *Quercus canariensis*, *Quercus afares*, Béjaïa.

Abstract

The current study deals with the response of three tree species of the western Babors mountain range (Béjaïa, Algeria) to climate variability. The dendrochronological approach is adopted in order to identify the climate signal recorded in the tree rings of a resinous (Atlas cedar) and two deciduous species (Algerian and African oaks), examine the sensitivity of each species towards climate variability, and analyse the climate-growth relationships so as to provide the periods of the year over which the precipitation reconstruction is possible. Twenty healthy trees were cored using an increment borer in each of the selected stands, and a tree-ring chronology was developed for each of the considered species. The results show a high fluctuation in radial growth of the three forest species during the last four centuries, reflecting the strong climate variability experienced over this period in the study area. Furthermore, an increase in both humid and dry extreme events was identified from the second part of the twentieth century, attesting a trend toward more and more unpredictable climate conditions. The difference between the sensitivity of the cored trees species toward climate change is notable: Atlas cedar exhibited the strongest mean sensitivity and the African oak the weakest. Consequently, several periods of the year are proposed to be tested for dendrochronological precipitation reconstructions using the tree-ring series of Atlas cedar and Algerian oak, while the African oak series generated few alternatives for a statistical robust reconstruction model. These findings provide valuable elements to be taken into account within the framework of sustainable management of forest ecosystems and water resources within the study area in the context of the current climate change.

Keywords: dendrochronology, climate variability, *Cedrus atlantica*, *Quercus canariensis*, *Quercus afares*, Béjaïa.

Table des matières

Introduction	01
Chapitre I : Monographies du cèdre de l'Atlas, du chêne zéen et du chêne afarès	
1. Monographie du cèdre de l'Atlas	04
1.1 Aperçu sur le cèdre de l'Atlas	04
1.2 Position systématique	04
1.3 Caractéristiques du cèdre de l'Atlas	04
1.3.1. Caractéristiques botaniques	04
1.3.1.1. Port	04
1.3.1.2 Système racinaire	04
1.3.1.3 Ecorce	04
1.3.1.4 Rameaux	04
1.3.1.5 Feuilles (aiguilles)	05
1.3.1.6 Fleurs	05
1.3.1.7 Cônes	05
1.3.1.8 Graines	05
1.3.2 Caractéristiques écologiques	06
1.3.2.1 Bioclimat	06
1.3.2.2 Substrat	07
1.3.2.3 Topographie	07
1.4 Aire de répartition géographique	08
1.4.1 Aire naturelle	08
1.4.2 Aire d'introduction	09
2. Monographie du chêne zéen	09
2.1 Aperçu sur le chêne zéen	09
2.2 Systématique du chêne zéen	10
2.3 Caractéristiques du chêne zéen	11
2.3.1 Caractéristiques botaniques	11
2.3.1.1 Système racinaire	11
2.3.1.2 Tronc	11
2.3.1.3 Ecorce	11
2.3.1.4 Feuilles	11
2.3.1.5 Fleurs	11
2.3.1.6 Fruit	12

2.3.1.7 Rameaux	12
2.3.1.8 Bourgeons	12
2.3.2 Caractéristiques écologiques	12
2.3.2.1 Bioclimat	12
2.3.2.2 Substrat	12
2.3.2.3 Altitude	12
2.4 Aire de répartition	13
3. Monographie du chêne afarès	15
3.1 Aperçu sur le chêne afarès	15
3.2 Systématique du chêne afarès	15
3.3 Caractères du chêne afarès	15
3.3.1 Caractéristiques botaniques	15
3.3.1.1 Port	15
3.3.1.2 Ecorce	15
3.3.1.3 Rameaux	16
3.3.1.4 Bourgeons	16
3.3.1.5 Feuilles	16
3.3.1.6 Floraison	16
3.3.1.7 Fruit	17
3.3.1.8 Bois	17
3.3.2 Caractéristiques écologiques	17
3.3.2.1 Bioclimat	17
3.3.2.2 Substrat	17
3.4 Aire de répartition du chêne afarès	17
Chapitre II : Matériel et méthodes	
2. Milieu d'étude	20
2.1.1. Situation géographique des sites d'étude	20
2.1.2. Géologie	22
2.1.3. Sol	22
2.1.4. Géomorphologie	22
2.1.5. Végétation	22
2.1.6. Climat	23
2.1.7. Etat des forêts d'étude	24
2.2. Méthodes	24
2.2.1. Echantillonnage et préparation des échantillons	24

2.3. Analyse statistique	25
2.3.1. Etablissement des chronologies maitresses	25
2.3.1.1. Contrôle statistique de la qualité de l'interdatation	25
2.3.2. Standardisation des chronologies brutes	26
2.3.3. Analyse de la croissance radiale	27
2.3.3.1. Evolution de l'indice de croissance	27
2.3.3.2. Analyse des évènements extrêmes	27
2.3.3.3. Evolution de la sensibilité moyenne des arbres	28
2.3.4. Relation cerne-climat	28
Chapitre III : Résultats et discussion	
3.1. Etablissement des chronologies maîtresses	30
3.1.1. Contrôle statistique de la qualité de l'interdatation	30
3.1.2. Standardisation des chronologies brutes	33
3.2. Analyse de la croissance radiale	36
3.2.1. Evolution de l'indice de croissance	36
3.2.2. Analyse des évènements extrêmes	38
3.2.3. Evolution de la sensibilité moyenne des arbres	40
3.3. Relation cerne-climat	42
Conclusion	47

Liste des figures

Figure 1.1. Sujet du cèdre de l'Atlas au niveau de la forêt d'Ichmoul (Aurès) (photo : S. Slimani)	05
Figure 1.2. Rameaux du cèdre de l'Atlas portant a) des chatons mâles, des cônes femelles b) jeunes et c) matures et d) graines détachées d'un cône mature (photos : S.Slimani)	06
Figure 1.3. Aire de répartition du cèdre de l'Atlas en Algérie (Kherchouche <i>et al.</i> , 2021)	08
Figure 1.4. a) Sujet b) aspect de la surface du tronc et c) feuille du chêne zéen (photos : S. Slimani)	10
Figure 1.5. Répartition géographique du chêne zéen dans le bassin méditerranéen (Quézel et Bonin, 1980).....	13
Figure 1.6. Répartition de <i>Quercus canariensis</i> Willd. en Algérie (Kaouane,1987 <i>in</i> Rabhi, 2011)	14
Figure 1.7. a) Sujet b) aspect de la surface du tronc et c) feuille du chêne afarès (photos : S. Slimani).....	16
Figure 1.8. Distribution géographique de <i>Q. afares</i> (Quézel et Bonin, 1980)	18
Figure 2.1. Localisation des sites d'étude	20
Figure 2.2. Vue générale sur la cédraie du mont Takoucht (photo : S. Slimani)	21
Figure 2.3. Aspect de la chênaie caducifoliée du mont Issek en hiver (photo : S. Slimani)	21
Figure 2.4. Carottage d'un cèdre de l'Atlas à TAK (photo:S.Slimani)	24
Figure 2.5. Carottes poncées après montage sur des supports en bois rainurés : en haut, carotte du cèdre de l'Atlas, caractéristique des résineux, avec un cerne dont la limite est déterminée par un bois d'été sombre ; en bas, carotte du chêne zéen, caractéristique des feuillus caducifoliés avec un bois à zones poreuses (gros vaisseaux conducteurs du bois de printemps) suivies de zones compactes (bois d'été) (photo: S. Slimani).....	25
Figure 3.1. Chronologies maitresses brutes pour les trois espèces échantillonnées . La courbe continue représente la largeur du cerne de croissance et celle en pointillé le nombre d'échantillons	32
Figure 3.2. Chronologies résiduelles pour les trois espèces échantillonnées accompagnées de courbes de tendance d'une moyenne mobile de 10 ans	35
Figure 3.3. Évolution spatio-temporelle de la sensibilité moyenne (SM_x) pour la région d'étude. L'analyse repose sur les chronologies résiduelles au seuil EPS de 0,85 et les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période	40
Figure 3.4. 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) pour les trois chronologies établies	42
Figure 3.5. Corrélations entre l'indice de croissance des trois chronologies établies 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 <i>t-1</i>	43

Liste des tableaux

Tableau 1. Surfaces occupées par le cèdre de l'Atlas en Algérie (Kherchouche <i>et al.</i> ,2021)	09
Tableau 2.1. Caractéristiques géographiques et topographiques des deux sites d'étude.....	22
Tableau 3.1. Principales caractéristiques des chronologies maîtresses établies (TAK : cédraie de Takoucht, ISEQC : chêne zéen du mont Issek, ISEQA : chêne afarès du mont Issek)	30
Tableau 3.2. Principales statistiques des chronologies standardisées pour TAK, ISEQC et ISEQA (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = arstan)	34
Tableau 3.3. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) sur l'intervalle commun des chronologies pour TAK , ISEQC, ISEQA	34
Tableau 3.4. Longueur des chronologies résiduelles au seuil EPS de 0,85	36
Tableau 3.5. Stabilité temporelle de la corrélation entre l'indice de croissance et les précipitations de la première à la deuxième sous-période d'analyse	45

Introduction générale

Introduction générale :

Dans un contexte de changements climatiques rapides, le patrimoine forestier mondial, qui abrite une biodiversité complexe et abondante, est de plus en plus menacé. Les forêts jouent un rôle essentiel dans la régulation climatique, le cycle de l'eau, et la fourniture de services écosystémiques vitaux, tout en servant de refuge pour une biodiversité cruciale à l'équilibre des écosystèmes (Kappelle *et al.*, 1999). Cependant, l'élévation des températures, les changements dans les régimes de précipitations, et la multiplication des événements climatiques extrêmes mettent ces écosystèmes en péril, réduisant leur résilience et augmentant leur vulnérabilité (Bonan, 2008).

En plus des changements climatiques, les écosystèmes forestiers sont soumis à une pression croissante liée aux activités humaines, telles que la déforestation, l'exploitation forestière non durable et l'urbanisation. Ces actions contribuent non seulement à la fragmentation des habitats, mais amplifient également la vulnérabilité des forêts aux aléas climatiques. A titre d'exemple, la déforestation massive en Amazonie diminue la capacité de cette région à stocker du carbone, exacerbant ainsi les effets du changement climatique à l'échelle mondiale (Fearnside, 2005). Par ailleurs, l'intensification des sécheresses, la recrudescence des incendies de forêt et les infestations par des espèces invasives illustrent l'impact combiné du changement climatique et des activités humaines sur les écosystèmes forestiers (Allen *et al.*, 2010). Ces dégradations constituent une menace directe pour la biodiversité.

Les écosystèmes forestiers abritent de nombreuses espèces endémiques, dont certaines sont déjà en voie d'extinction en raison de la perte de leur habitat et des changements environnementaux (Laurance *et al.*, 2014). En outre, la réduction de la couverture forestière compromet des services écosystémiques essentiels, comme la régulation des cycles hydrologiques, la protection contre l'érosion des sols, et la préservation de la qualité de l'air (Watson *et al.*, 2018). Face à ces menaces, il est urgent de développer des stratégies de gestion durable des forêts qui prennent en compte à la fois la protection de la biodiversité et les défis posés par les changements climatiques.

Cette étude a été menée au niveau de deux monts adjacents situés dans la partie orientale de la wilaya de Béjaïa, au cœur de la région montagneuse de la Kabylie des Babors. Reposant sur l'approche dendrochronologique, elle analyse la réponse de la cédraie du mont Takoucht et de la chênaie caducifoliée à chêne zéen et chêne afarès du mont Issek à la variabilité climatique.

Les principaux objectifs de cette recherche sont de *i*) caractériser la force du signal climatique enregistré dans les cernes des arbres de chacun des peuplements étudiés, *ii*) comparer les sensibilités des trois essences forestières vis-à-vis de la variabilité climatique et, à travers l'analyse de la relation cerne-climat, *iii*) proposer des périodes de l'année sur lesquelles des modèles statistiques robustes pourraient être établis afin de reconstituer les précipitations passées pour la région d'étude via les chronologies de cernes de croissances des arbres sondés.

Le présent document est principalement structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la monographie des trois espèces forestières retenues dans le cadre de cette étude. Le deuxième chapitre fournit un aperçu des sites d'étude et détaille la méthodologie de travail adoptée. Enfin, le troisième et dernier chapitre présente les résultats obtenus ainsi que leur discussion.

Chapitre I

**Monographies du cèdre de l'Atlas, du chêne zéen et du
chêne afarès**

1. Monographie du cèdre de l'Atlas

1.1. Aperçu sur le cèdre de l'Atlas

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica Manetti*) est une essence endémique des montagnes de l'Afrique du Nord (Maroc, Algérie). Il est considéré comme l'espèce la plus importante, économiquement et écologiquement, de la montagne méditerranéenne (Benchekroun, 1993 ; M'hirit *et al* 2006 in Ourdani 2017 ; Terrab *et al.*, 2006).

1.2. Position systématique

Cedrus atlantica Manetti appartient à l'embranchement des *Spermaphytes*, sous-embranchement des *Gymnospermes* (Gaussen, 1967), classe des *Vectrices*, ordre des *Coniferales*, famille des *Pinaceae* et au genre *Cedrus* (Toth, 2005).

1.3. Caractéristiques du cèdre de l'Atlas

1.3.1. Caractéristiques botaniques

1.3.1.1. Port

Le cèdre de l'Atlas est un arbre de forme pyramidale au port majestueux et aux rameaux étalés, qui peut atteindre 40 mètres de haut. La silhouette élancée se termine en flèche légèrement courbée quand il est jeune, puis, avec l'âge, il tend à s'étaler en parasol (Fidah, 2016) et la partie supérieure forme un plan presque horizontal ; « on dit alors que le cèdre fait la table » (Toth, 1990) (Figure 1.1).

1.3.1.2. Système racinaire

Le système racinaire du cèdre de l'Atlas est très développé, pivotant, fixant l'arbre au sol. Les racines des plants d'une année sont comprises entre 14 et 20 cm (Toth, 1978).

1.3.1.3. Écorce

L'écorce du cèdre de l'Atlas est lisse, grise claire, bientôt remplacée par un rhytidome épais, rugueux et noirâtre ; de profonds sillons le parcourent et conduisent l'eau des précipitations aux racines (Maire, 1952).

1.3.1.4. Rameaux

Il y a deux types de rameaux : long (mésoblaste) et court (épiblaste) portant les rosettes d'aiguilles (Arbez, 1987) (Figure 1.2).



Figure 1.1. Sujet du cèdre de l'Atlas au niveau de la forêt d'Ichmoul (Aurès) (photo : S. Slimani).

1.3.1.5. Feuilles (aiguilles)

Les feuilles sont d'une longueur de 1,5 à 2,5 cm, raides, pointues (Figure 1.2), irrégulièrement tétraogones ou subcylindriques, vertes ou glauques, à section presque carrée, isolées sur rameaux longs, en touffes sur rameaux courts et persistent 3 à 4 ans (Riou-Nivert, 2001).

1.3.1.6. Fleurs

Le cèdre de l'Atlas est une espèce monoïque. Le chaton mâle est de forme ovoïde et de couleur jaune orangé et le cônelet femelle est plus petit, de forme ovoïde (Figure 1.2) et de couleur vert bleuâtre (M'hirit *et al.* 2006 in Ourdani 2017).

1.3.1.7. Cônes

Les cônes sont cylindriques à sommet aplati, de 5 à 8 cm de long (Figure 1.2), vert avant maturité, puis brun (Debazac, 1964). Les vieux cèdres sont des porteurs du plus grand nombre de cônes aux graines fertiles (Toth, 1973).

1.3.1.8. Graines

Les graines du cèdre de l'Atlas sont de 8 à 12 mm de taille, assez grosses, pointues et longues avec une aile développée (Figure 1.2) subtriangulaire marron roux à marron clair et peut dépasser un poids de 0,1 g (Boukerker, 2016).



Figure 1. 2. Rameaux du cèdre de l'Atlas portant a) des chatons mâles, des cônes femelles b) jeunes et c) matures et d) graines détachées d'un cône mature (photos : S. Slimani).

1.3.2. Caractéristiques écologiques

1.3.2.1. Bioclimat

Le cèdre de l'Atlas pourrait être considéré comme une essence de climat de transition entre les climats froids et humides et les climats chauds et secs (Aussenac, 1984). Son optimum correspond à l'étage méditerranéen (M'hirit, 1982).

Selon Boudy (1950), le cèdre de l'Atlas peut vivre entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il est ainsi capable de supporter des variations climatiques importantes (humidité et températures) et se développer dans des conditions écologiques très différentes de son aire d'origine. Cependant, chez les jeunes semis, l'action des basses températures se traduit par une diminution très nette de la photosynthèse au-dessous de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ducrey, 1981).

Abourouh (1983) rapporte que l'étage humide, avec une précipitation de 800 à 1 200 mm par an, est par excellence la zone préférée de *Cedrus atlantica*. Les cédraies sèches des Aurès et du Hodna ne reçoivent qu'une tranche pluviométrique comprise entre 500 et 700 mm par an. Plus humides, celles du Djurdjura, des Babors, de l'Ouarsenis, de Chréa et de Meurdja reçoivent une pluviométrie importante de 1 100 à 2 100 mm par an (Derridj, 1990).

1.3.2.2. Substrat

Le cèdre de l'Atlas est indifférent à la composition chimique du sol. L'étude sur la croissance radiale réalisée par Nedjahi (1993) a montré que le sol agit par son degré d'humidité, ses propriétés physiques et chimiques (texture, structure et son pouvoir de rétention d'eau) et sa richesse en éléments minéraux sur la croissance du cèdre de l'Atlas.

Selon Derridj (1985) le cèdre préfère les sols meubles, caillouteux, profonds et perméables et redoute les terrains mal drainés, asphyxiants et les sols à dolomie.

Les cédraies de l'Aurès et du Belezma présentent une certaine prédilection pour les grès et les dolomies. Cependant, cette préférence pour ces deux roches très éloignées chimiquement l'une de l'autre s'expliquerait beaucoup plus par les caractères physiques que les caractères chimiques. En effet, les deux roches donnent des sols légers qui facilitent le développement racinaire des jeunes semis et leur permettent d'échapper à la sécheresse estivale (Abdessemed, 1981).

1.3.2.3. Topographie

Selon Emberger (1938), les limites altitudinales du cèdre de l'Atlas varient selon les conditions climatiques et le relief.

Au Maroc, la limite inférieure se situe entre 1 400 m dans le Rif occidental et 1 800 m dans le Haut-Atlas oriental. La limite supérieure varie entre 2 000 m au Moyen-Atlas et 2 400 m dans le Rif central et Haut-Atlas oriental (M'hirit, 1994).

En Algérie, la limite inférieure se situe entre 1 350 m dans les massifs de l'Aurès et du Belezma et 1 400 m dans les massifs du Djurdjura et des Babors. La limite supérieure se situe quant à elle entre 2 200 m dans le Djurdjura et les Babors et 2 300 m dans l'Aurès et le Belezma (M'hirit, 1994). D'après Derridj (1990), les plus belles cédraies sont localisées sur les versants septentrionaux, qui présentent une limite inférieure plus basse que celles établies sur le versant sud.

Krouchi (2010) rapporte qu'à Tala Guilef, sur le versant nord du Djurdjura, la cédraie s'étend depuis 1 100 m environ, dans les ravins, où les jeunes cèdres constituent de belles plages de rajeunissement. Meddour (1994), signale que la cédraie de Chréa, située dans l'Atlas blidéen, le massif algérien le moins élevé coiffé par une cédraie, débute vers 1 000 à 1 100 m d'altitude sur le flanc nord par l'apparition de nombreux cèdres isolés ou en bouquets dans la forêt de chêne vert (*Quercus ilex*), alors que sur le flanc sud, la cédraie ne commence que vers 1 400 m d'altitude.

1.4. Aire de répartition géographique du cèdre de l'Atlas

1.4.1. Aire naturelle

Le cèdre de l'Atlas est une espèce des montagnes de l'Afrique du Nord (Algérie et Maroc). Sa répartition est nettement disjointe et liée essentiellement à l'orographie du Maghreb (Quézel, 1998). Dans son aire naturelle, il s'organise en sept blocs : quatre dans les montagnes marocaines (Rif, Tazekka, Moyen Atlas et Grand Atlas Oriental) et trois dans les montagnes algériennes (Atlas Tellien, Haut Atlas oriental et Aurès, Atlas saharien) (M'hirit, 1999).

Au Maroc, le cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) comprend le Rif marocain (15 000 ha), Tazekka (850 ha), le moyen Atlas (120 000 ha), le haut-Atlas Oriental (26 000 ha) (M'hirit, 1999).

En Algérie, le cèdre de l'Atlas se répartit en petits îlots limités aux massifs montagneux des Hauts Plateaux Est (Aurès, Belezma, Hodna), du Nord-Centre (Babors, Djurdjura, Atlas blidéen, Ouarsenis, Dahra) et du Nord-Ouest (Monts de Saïda) (Figure 1.3) (Kherchouche *et al.*, 2021).

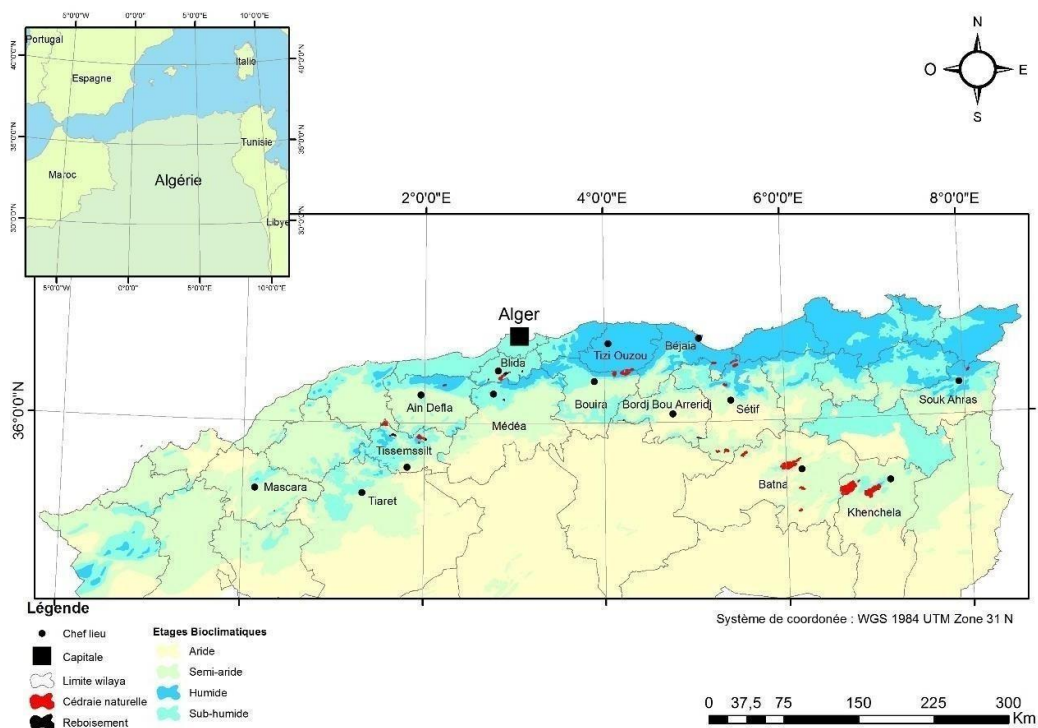


Figure 1.3. Aire de répartition du cèdre de l'Atlas en Algérie (Kherchouche *et al.*, 2021).

Vu l'insuffisance des inventaires forestiers et l'aire très morcelée et disjointe de l'espèce, les données des surfaces occupées par nos cédraies, soumises parfois à des estimations personnelles, notamment après le dernier épisode de dépérissement forestier qui a surtout marqué les cédraies de l'Atlas saharien, sont très hétérogènes (Kherchouche *et al.*, 2021). Les surfaces occupées (spontanée et reboisement) rapportées par plusieurs auteurs sont consignées dans le tableau 1.

1.4.2. Aire d'introduction

Le cèdre de l'Atlas a été employé d'abord comme espèce ornementale et ensuite comme espèce de reboisement dans les pays circumméditerranéens. On cite les dates d'introduction de 1862 sur le mont Ventoux (France), 1864 en Italie et 1890 en Bulgarie (M'hirit, 1982).

Le cèdre de l'Atlas est introduit à titre expérimental en ex-Yougoslavie, en Espagne, au Portugal, en Angleterre et en Belgique. Il a été introduit même en dehors des pays du pourtour méditerranéen, en ex-U.R.S.S. comme espèce de reboisement en 1890. Aux U.S.A., il est parfaitement adapté et fait actuellement l'objet de vastes projets le reboisement (Nedjahi, 1988).

Tableau 1. Surfaces occupées par le cèdre de l'Atlas en Algérie (Kherchouche *et al.*, 2021).

Atlas	Massif montagneux	Superficie (ha)	Origine
Atlas tellien	Ouarsenis	960 ⁽¹⁾ 1 000 ⁽³⁾ 2 000 ⁽⁴⁾ 2 396,8 ⁽⁵⁾	Spontané
		438,3 ⁽⁵⁾	Reboisement
	Monts de Saïda	9,1 ⁽⁵⁾	Spontané
	Atlas Blidéen	1 040 ⁽¹⁾ 1 000 ⁽³⁾⁽⁴⁾ 785,7 ⁽⁵⁾	Spontané
		235,4 ⁽⁵⁾	Reboisement
	Djurdjura	2 000 ⁽³⁾⁽⁴⁾ 3 329,9 ⁽⁵⁾	Spontané
	Bibans	11,6 ⁽⁵⁾	Reboisement
	Babors	1 300 ⁽¹⁾⁽⁴⁾ 500 ⁽³⁾ 2 171,6 ⁽⁵⁾	Spontané
	Monts de Medjerda (Dj M'cid)	316,7 ⁽⁵⁾	Reboisement
	Dahra (Dj Zaccar)	222,9 ⁽⁵⁾	Spontané
Atlas saharien	Hodna	5 000 ⁽³⁾ 8 000 ⁽⁴⁾ 13 000 ⁽²⁾ 1 676,7 ⁽⁵⁾	Spontané
		31,7 ⁽⁵⁾	Reboisement
	Belezma	8 100 ⁽¹⁾ 5 000 ⁽³⁾ 5 881,5 ⁽⁵⁾	Spontané
	Aurès	9 350 ⁽¹⁾ 5 000 ⁽³⁾ 16 472,9 ⁽⁵⁾	Spontané
Total		30 000 ⁽¹⁾ 19 500 ⁽³⁾ 31 300 ⁽⁴⁾ 32 947 ⁽⁵⁾	Spontané
		1 034	Reboisement

(1) Boudy (1955), (2) M'Hirit (1980), (3) Quézel (1998), (4) Harfouche et Nedjahi (2003) et (5) Bneder (2009).

2. Monographie du chêne zéen

2.1. Aperçu sur le chêne zéen

Le chêne zéen (Figure 1.4) est une espèce monoïque caducifoliée (Mechergui *et al.*, 2021). Il est réparti sur le pourtour méditerranéen, 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 (Kaouane 1987 *in* Rabhi, 2011).

En raison d'une importante variabilité au sein de chaque espèce, ainsi que les fréquents phénomènes d'hybridation, la détermination spécifique du chêne zéen présente de nombreuses difficultés (Quézel et Bonin, 1980). De plus, il est considéré comme une espèce très polymorphe du fait de la complexité de ses micromorphes ; d'où l'observation de nombreuses espèce, sous- espèce, variétés et formes (Emberger, 1939 ; Maire, 1961 ; Quézel et Santa, 1962).

2.2. Systématique du chêne zéen

Comme cité précédemment, le chêne zéen présente une difficulté d'identification systématique d'autant qu'il s'hybride facilement. Ce qui est dû à un polymorphisme (Maire, 1961).

Del Villar (1949) a remarqué qu'en plus des espèces pures, ce chêne présente également une variété de formes, mixtes ou intermédiaires. Du fait de l'effet conjugué de l'hybridation et des facteurs écologiques, il a distingué que plusieurs espèces d'Afrique du Nord peuvent être unifiées en une espèce collective : *Quercus faginea*.

Quézel et Bonin (1980) ont identifié deux espèces de chênes dans le groupe ibéro- maghrébin : *Quercus faginea* et *Quercus canariensis*.

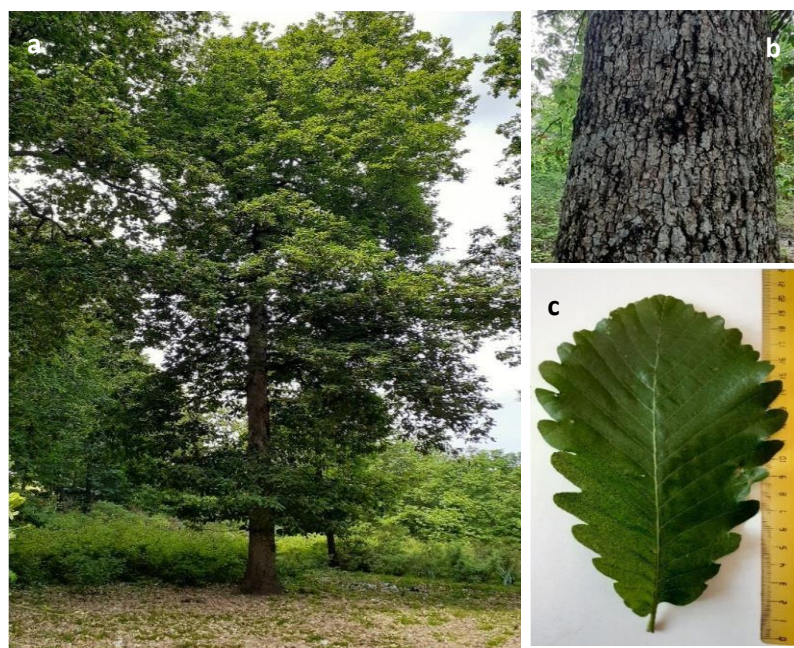


Figure 1.4. a) Sujet b) aspect de la surface du tronc et c) feuille du chêne zéen (photos : S. Slimani).

Zine El Abidine (1987) propose d'intégrer les formes du chêne zéen en une seule espèce collective qui est subdivisée en trois sous-espèces : ssp. *canariensis*, ssp. *faginea* et ssp. *tlemcenensis*.

Aissi *et al.* (2021) ont confirmé à travers une étude sur l'analyse morphologique et taxonomique du complexe *Quercus faginea* (*Fagaceae*) que le complexe *Q. faginea* Lam. est représenté en Algérie par deux espèces : *Quercus canariensis* Willd. et *Q. faginea* Lam., elle-même représentée par deux taxons, subsp. *faginea* et subsp. *broteroi*.

Actuellement, la classification adoptée est celle de Quézel et Bonin (1980) ; le chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., appartient à l'embranchement des *Spermaphytes* et au sous-embranchement des *Angiospermes*. Il fait partie de la classe des *Dicotylédones*, de l'ordre des *Fagales*, de la famille des *Fagaceae* et du genre *Quercus*.

2.3. Caractéristiques du chêne zéen

2.3.1. Caractéristiques botaniques

Le chêne zéen est une espèce solide plus au moins couverte sur de grandes surfaces par un lichen qui permet de l'identifier à distance (Maire, 1963).

2.3.1.1. Système racinaire

L'enracinement du chêne zéen est profond, pivotant et puissant (Maire, 1961).

2.3.1.2. Tronc

Le chêne zéen présente un tronc élancé (Figure 1.4) 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).

2.3.1.3. Ecorce

L'arbre du chêne zéen porte une écorce gris-brun, lisse les premières années puis crevassée rapidement (Maire, 1963).

2.3.1.4. Feuilles

Les feuilles sont caduques, ovales, sinuées, dentées et pubescentes à la face supérieure (Figure 1.4). Leur longueur est de 10 à 15 cm et leur largeur de 5 à 8 cm (Maire, 1961).

2.3.1.5. 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 (Messaoudène *et al.*, 2008; Tafer, 2000).

2.3.1.6. Fruit

Le fruit du chêne zéen est un gland à cupule peu profonde couvrant 1/3 de fruit, de longueur de 20 à 40 mm et d'un diamètre de 10 à 15 mm de diamètre, agglomérés par 2 à 3 glands à écailles courtes (Maire, 1963), arrivant à maturité en octobre (Maire, 1961).

2.3.1.7. Rameaux

Les rameaux du chêne zéen sont abondants, forts et tomenteux, gris-vert très pubescents glabres et lisses à lenticelles abondantes (Maire, 1963).

2.3.1.8. Bourgeons

Les bourgeons du chêne zéen sont de forme conique à ovoïde et protégés par des écailles, de 7mm environ à écailles brun pale recouvertes de poils blancs et ciliées sur les bords (Messaoudène *et al.*, 2008 ; Tafer, 2000).

2.3.2. Caractéristiques écologiques

2.3.2.1. Bioclimat

Le chêne zéen se limite aux variantes tempérées et fraîches du bioclimat humide et il peut se développer dans le subhumide frais et l'humide chaud. Il résiste aux vents violents et aux neiges abondantes. Son optimum de production est atteint dans l'étage supra-méditerranéen (Quézel, 1956 ; Quézel et Médail, 2003; Mechergui *et al.*, 2021).

La température moyenne qui convient au chêne zéen est de 15 à 16 °C et il supporte les basses températures allant de – 8 à –10 °C (Maire ,1926).

2.3.2.2. Substrat

Le chêne zéen peut être considéré comme indifférent à la composition physique et chimique de son substrat, pourvu que le sol soit frais et pas trop compact. Il prospère sur les terrains calcaires ainsi que siliceux, mais il ne pousse bien que sur des sols profonds et perméables (Boudy, 1950 ; Mechergui *et al.*, 2021).

2.3.2.3. Altitude

Selon Quézel (1956) et Quézel et Médail (2003), le chêne zéen trouve son optimum de développement entre 800 et 1 500 m, dans un niveau altitudinal supra-méditerranéen, comme il arrive à pénétrer localement dans le montagnard méditerranéen où il se trouve en contact avec les cédraies et les sapinières. En Algérie le chêne zéen se localise entre 850 et 2 000 m d'altitude.

En Kabylie, il s'étend entre 800 et 1 646 m d'altitude (Djebel ez zéen) et atteint 2 000 m d'altitude dans les Babors (Messaoudène, 1989). Dans les massifs d'Ath Ghobri et de l'Akfadou, il occupe les étages thermo- et mésoméditerranéen et est accompagné d'une grande richesse floristique

(Laribi, 2000). Sur les versants sud et les lignes de crêtes, il domine jusqu'à 1400 m d'altitude (Messaoudène, 1996). Toutefois, sur les pentes exposées au nord, on retrouve le Chêne zéen à 700 m d'altitude. Il progresse indiscutablement dans les subéraies mésoméditerranéennes surtout en grande Kabylie (Meddour, 1993).

2.4. Aire de répartition

L'aire de distribution naturelle du chêne zéen se limite à la région de la Méditerranée occidentale (territoire ibéro-maghrébin) (Figure 1.5). Elle est localisée dans la péninsule Ibérique dans l'est et sud d'Espagne, au Portugal, quelque fois dans le sud-est de France, ainsi qu'en Afrique du Nord : en Algérie, au Maroc et dans les montagnes tunisiennes (Zulueta, 1980 ; Aissi, 2019).

C'est en Algérie que les belles futaies de chêne zéen se rencontrent (Boudy, 1950). 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 et il forme toutefois deux vastes massifs : Feidja et Ain Draham.

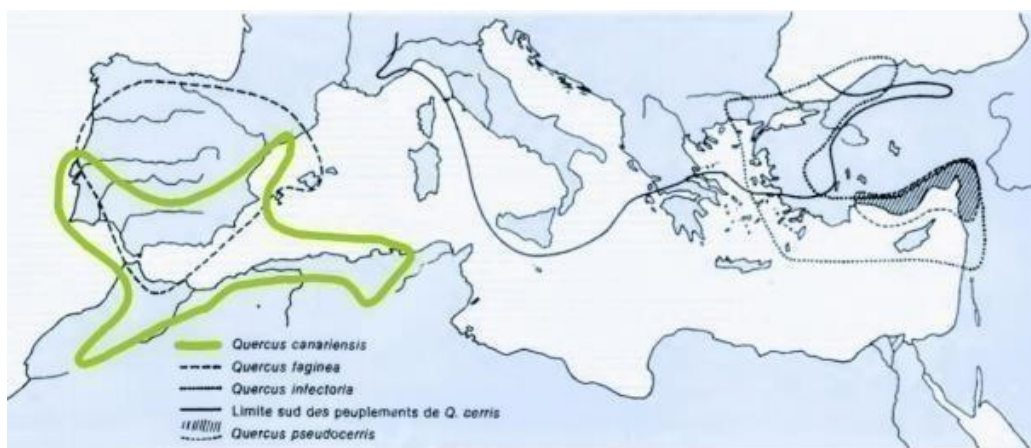


Figure 1.5. Répartition géographique du chêne zéen dans le bassin méditerranéen (Quézel et Bonin, 1980).

En Algérie la répartition du chêne zéen est montagnarde, occupant ainsi une place très importante qui couvre 6 500 ha sur les massifs montagneux septentrionaux (Messaoudène et Tessier, 1991). Les plus importants peuplements se rencontrent principalement dans la région numidienne (Boudy, 1952), notamment de très beaux peuplements et les plus vigoureux à base de *Quercus canariensis* Willd. sont répartis allant de la Kabylie jusqu'à la frontière tunisienne (Zerizer et Mansseri, 2003).

Le chêne zéen est présent dans les massifs des Babors (monts Babor, Tamentout, Tamesguida, Guerrouche, Issek...), sur la portion orientale de la grande Kabylie, notamment au niveau des massifs de l'Akfadou des Ath Ghobri (Laribi *et al.*, 2008 ; Messaoudène *et al.*, 2008), à El Tarf (Gourak), dans la forêt domaniale d'Ouled Bechiche et à Souk-Ahras sur les monts de Medjerda et Djebel Ghorra, en continuité avec la Kroumirie en Tunisie. Des peuplements à l'état disséminés sont aussi localisés dans les régions de Ténès, Theniet El Had et Cherchell, ainsi que dans les massifs de Chréa, du Djurdjura, de l'Aurès et du Hodna (Maire, 1961). Des boisements de moindre importance s'observent à Skikda (Collo) et à Annaba (l'Edough), d'autres encore très réduits sont éparpillés sur presque tous les massifs montagneux algériens (Quézel, 1956 ; Rabhi, 2011) (Figure 6).

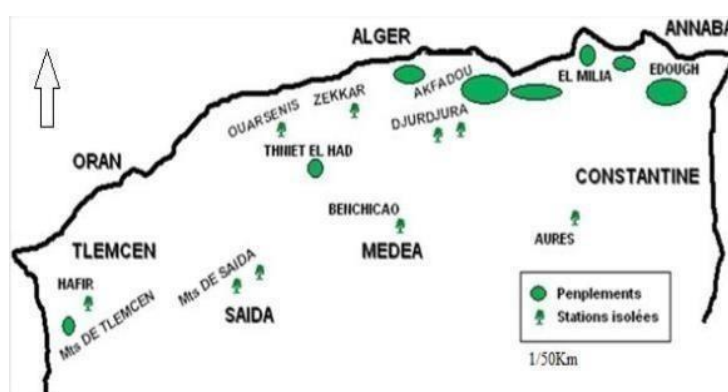


Figure 1.6. Répartition de *Quercus canariensis* Willd. en Algérie (Kaouane,1987 in Rabhi,2011).

Selon Aissi (2019) et Aissi *et al.* (2019), en Afrique du Nord, et particulièrement en Algérie, les chênaies sont dominées par *Quercus canariensis* Willd. et *Quercus faginea* Lam., chêne zéen a petite feuille. Leur distribution spatiale dans le pays est très inégale. *Q. canariensis* couvre de grandes surfaces, principalement dans les zones côtières du centre à l'extrême est, mais également à l'extrême ouest. Au contraire, *Q. faginea* n'est connu que dans quatre forêts découvertes récemment et situées respectivement à l'extrême ouest du pays (monts de Tlemcen, Saïda et Tiaret) et à l'est du pays, dans le Chélia (Aurès) où il n'y a qu'un seul peuplement.

3. Monographie du chêne afarès

3.1. Aperçu sur le chêne afarès

En se basant sur des traits génétiques et morphologiques, le chêne afarès est défini comme une espèce issue d'une hybridation stable. En effet l'analyse génétique dans deux populations (Algérie et Tunisie) conduite par Mir *et al.* (2006), en utilisant des allozymes et des marqueurs chloroplastiques, a montré que *Quercus afares* (espèce caduque) est issu de l'hybridation entre *Q. suber* (espèce sempervirente) et *Q. canariensis* (espèce semi-caduque). *Q. suber* représente le parent maternel du fait de la dominance de ses allèles dans le génome de l'afarès.

Quercus afares s'hybride facilement avec *Quercus suber* quand ils sont en mélange pour donner *Q. kabylica* ou *Q. numidica* (Boudy, 1950).

3.2. Systématique du chêne afarès

Selon Boudy (1950), le chêne afarès appartient à la famille des *Fagaceae*, qui comprend entre 200 et 600 espèces (chiffres variables selon les auteurs, vu le nombre important des hybrides). Il fait partie du genre des *Quercus* (chênes), formant le groupe d'arbres ou d'arbustes situés majoritairement dans l'hémisphère nord, dont les espèces forestières sont des plus polymorphes au plan génétique d'où leur forte capacité d'adaptation.

3.3. Caractères du Chêne afarès

3.3.1. Caractéristiques botaniques

Selon Boudy (1950) et Maire (1961), le chêne afarès est une espèce monoïque, qui se distingue nettement du chêne zéen, avec lequel il est en mélange, par son port plus élancé, son écorce et ses feuilles plus étroites. Il peut atteindre les dimensions maximales du chêne zéen, soit 30 m de hauteur et 3 m de circonférence à 1,30 m. Sa tige est généralement rectiligne, à écorce profonde. La cime est fastigiée, parfois pyramidale, atteignant les dimensions du chêne zéen (Figure 1.7).

Les caractéristiques botaniques suivantes sont celles rapportées par Boudy (1950) et Maire (1961).

3.3.1.1. Port

Jeune, le chêne afarès présente un port pyramidal ou fastigié (Figure 1.7), qui s'étale ensuite avec l'âge.

3.3.1.2. Écorce

L'écorce du chêne afarès est épaisse, très rugueuse et de couleur gris-brun (Figure 1.7).



Figure 1.7. a) Sujet b) aspect de la surface du tronc et c) feuille du chêne afarès (photos : S. Slimani).

3.3.1.3. Rameaux

Les jeunes rameaux sont couverts d'un dense tomentum blanchâtre. Ensuite, ils deviennent glabres et laissent apparaître des lenticelles saillantes.

3.3.1.4. Bourgeons

Ils sont ovoïdes et tomenteux. Les bourgeons terminaux sont accompagnés de stipules allongées et persistantes.

3.3.1.5. Feuilles

Les feuilles du chêne afarès sont alternes, tardivement caduques, simples, oblongues à ovales, longues de 6 à 12 cm et larges de 4 à 8 cm. Le bord est doté de larges dents triangulaires aigües et terminées par un mucron (Figure 1.7).

3.3.1.6. Floraison

La floraison du chêne afarès se fait en juin et est sans intérêt. Les fleurs des deux sexes sont séparées sur le même arbre.

3.3.1.7. Fruit

Le gland, fruit du chêne afarès, est à maturation bisannuelle. Il est de forme oblong ou ovoïde, plus ou moins strié, long de 3,5 à 4,5 cm, légèrement renflé à la base et atténué au sommet, de couleur brun roux et est glabre sauf au niveau du mucron. La cupule est haute de 1,5 à 2 cm et englobe le tiers du gland.

3.3.1.8. Bois

Le chêne afarès possède un bois d'œuvre dur, dense et veiné avec un aubier très abondant.

3.3.2. Caractéristiques écologiques

3.3.2.1. Bioclimat

Le chêne afarès est régi par un déterminisme édaphique, du moins en partie. Il est situé surtout entre 1000 et 1300 m d'altitude du bioclimat humide frais au mésoméditerranéen supérieur (Laribi, 2000 ; Meddour, 2010).

3.3.2.2. Substrat

Le chêne afarès s'établit plutôt sur un sol peu profond où affleurent les argiles sous-numidiennes (Laribi, 2000; Meddour, 2010).

3.4. Aire de répartition du chêne afarès

Quercus afares est une espèce endémique algéro-tunisienne. Son aire de distribution est très limitée et s'étend de la frontière tunisienne jusqu'au méridien de Cherchell en Algérie (Laidi, 2018).

On le rencontre en Kabylie, au niveau des forêts des Ath Ghobri, de l'Akfadou, des Barbors (où il est en contact avec le cèdre de l'Atlas et le sapin de Numidie sur le versant nord), de Beni Affar, de Oued Asqueur, de Tamentout, de Guerrouche et dans les forêts de Djebel Dyr à El Taref et d'El Kala, qui correspond à sa limite orientale en Algérie (Boudy, 1950 ; Quézel et Santa, 1962). Dans l'Akfadou, Meddour (2010) le signale à l'état pur (populations monospécifiques) surtout entre 1 000 et 1 300 m d'altitude et sur des sols détériorés par les incendies.

Les données limitées de la littérature rapportent que ce chêne était présent en Tunisie dans au moins trois sites : Djebel El Ghorra, Ain Zena et Dar Fatma (stations alticoles) et qu'actuellement, il ne subsiste que dans une seule population à Ain Zena (Hasnaoui, 1992 ; Mir *et al.* 2006 ; Mhamdi, 2014) (Figure 1.8).

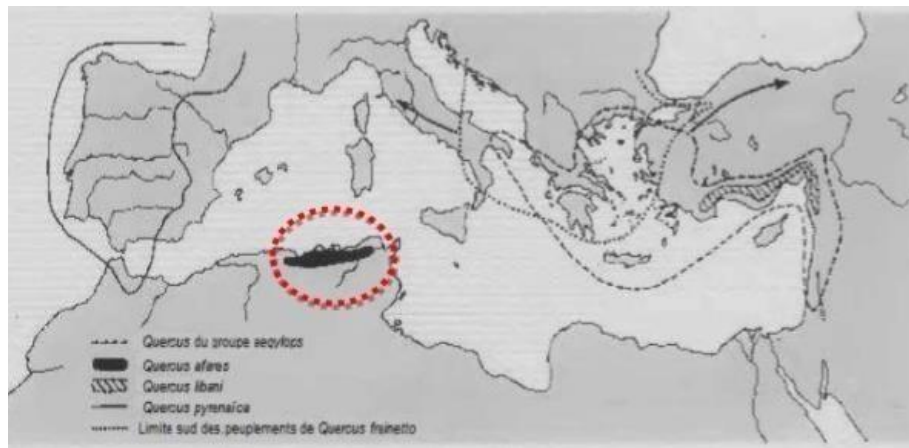


Figure 1.8. Distribution géographique de *Q. afares* (Quézel et Bonin, 1980).

Chapitre II : Matériel et méthodes

2.1. Milieu d'étude

2.1.1. Situation géographique des sites d'étude

La présente étude a été réalisée dans deux sites adjacents au cœur de la région montagneuse de la Kabylie des Babors, au niveau des massifs boisés orientaux de la wilaya de Béjaïa (Figure 2.1). Le premier site est celui du mont Takoucht (TAK), où le matériel biologique ciblé est le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) ; le deuxième site est le mont Issek (ISE), dont l'aire d'échantillonnage est une formation de feuillues caducifoliés à chêne zéen (*Quercus canariensis*) et chêne afarès (*Q. afares*).



Figure 2.1. Localisation des sites d'étude.

TAK culmine à 1896 mètres d'altitude et est entouré par plusieurs montagnes : le mont Issek au nord, le massif de Kherrata au sud, Adrar Amellal à l'est et Djebel Bou Amarane à l'ouest. Son territoire forestier couvre une étendue de 467,50 hectares, localisée principalement dans la commune d'Ait Smail (Wilaya de Bejaia). Il est bordé par les villages de Tala Atta (commune d'Ait Smail) et d'Ait Ali Oumhend (commune de Taskriout) au nord, par le village de Djermouna (commune de Kherrata) au sud, par Adrar Amellal à l'est et par le village de Tararist (commune de Bouandas, Sétif) à l'ouest.

Faisant face au golfe de Béjaïa, ISE est situé à environ 6 km à vol d'oiseau au nord de TAK, à 23 km au sud-est de Bejaia, entre les communes de Tizi N'Berber au nord et d'Ait Smail au sud, avec une limite naturelle marquée par une crête culminant à environ 1734 mètres d'altitude.

Les sites d'étude se présentent avec deux flancs aux caractéristiques différentes : l'ubac est humide, verdoyant et assez boisé ; l'adret est sec, rocailleux, et très peu couvert par la végétation, dont la présence de quelques rares arbres se limite vers les sommets des deux monts (Figures 2.2 et 2.3).

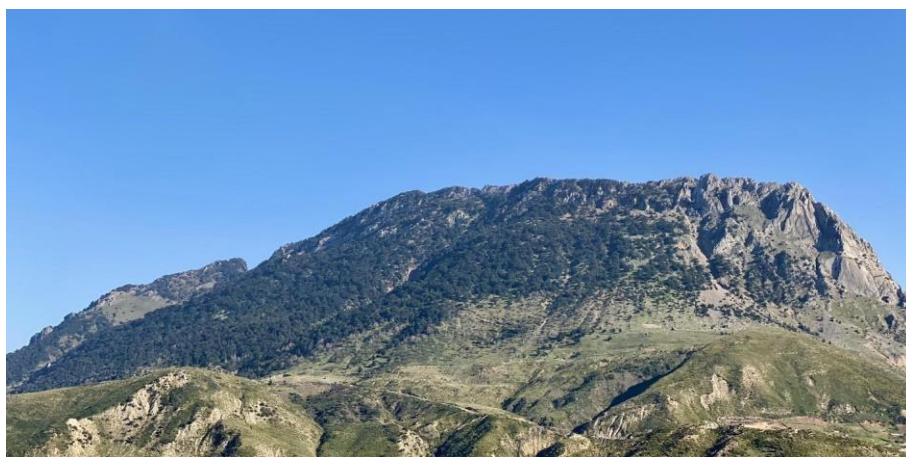


Figure 2.2. Vue générale sur la cédraie du mont Takoucht (photo : S. Slimani).



Figure 2.3. Aspect de la chênaie caducifoliée du mont Issek en hiver (photo : S. Slimani).

Comme signalé précédemment, TAK est représenté par une seule essence forestière, *C. atlantica*, tandis que ISE comporte deux aires d'échantillonnages qui se chevauchent : ISEQC, représentée par *Q. canariensis* et ISEQA par *Q. afares*. Les caractéristiques géographiques et topographiques de ces aires d'échantillonnage sont consignées dans le tableau ci-après.

Tableau 2.1. Caractéristiques géographiques et topographiques des deux sites d'étude.

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Exposition	Pente (%)
TAK	36°31'30,3''N	005°12'01,6''E	1378-1713 m	Versant nord	60-80%
ISE	ISEQC 36°33'59,9''N	005°13'08,7''E	1588-1689 m	Versant nord	50-70 %
	ISEQA 36°34'01.3''N	005°13'01.7''E	1462-1672 m	Versant nord	45-80 %

2.1.2. Géologie

Selon Obert (1984), la géologie des Babors est caractérisée par une structure constituée de chaînons calcaires qui bordent la côte du golfe de Bejaïa. Ces montagnes exposent les couches les plus internes du domaine tellien, avec la majorité des déformations géologiques survenues à la fin du Crétacé. La complexité de l'évolution tectonique au Mésozoïque est représentative de l'ensemble de l'orogénèse tellienne, influencée par la position du domaine sur la marge nord de la plaque africaine. Cette évolution peut être comparée à une zone décrochante étendue, soumise aux mouvements de coulissage de l'Afrique par rapport à l'Europe au cours de la première partie du Mésozoïque.

2.1.3. Sol

Le substrat de TAK repose sur une roche mère calcaire, donnant des sols superficiels avec une forte porosité et un drainage rapide. La litière se compose principalement des feuilles provenant de la végétation dominée par le cèdre de l'Atlas et le chêne vert. A ISE, le sol est instable et se compose principalement de calcaires, de schistes et de grès, tous présentant une forte porosité et un drainage rapide, comme décrit par (Duplan 1952 in Ourdani 2017) et Obert (1974). Par endroits, une épaisse couche de litière se forme sur le versant nord.

2.1.4. Géomorphologie

Nos aires d'échantillonnage sont localisées au niveau d'une zone montagneuse, avec des pentes élevées, voire raides. Les arbres échantillonnés se présentent sur différentes expositions sur le versant nord. Leurs altitudes sont plutôt déterminées par l'aire naturelle de distribution des espèces étudiées : elle est plus élevée à TAK, car le cèdre de l'Atlas se développe mieux en hautes altitudes à ISE, la plupart des chênes sondés sont localisés vers le sommet de la montagne.

2.1.5. Végétation

L'aire d'échantillonnage de TAK une cédraie plus ou moins pure, avec, entre autres, une présence mineure du *Quercus ilex*, et, notable, par endroits, de *Taxus baccata* et de *Juniperus oxycedrus*. La strate herbacée est riche et variée, comprenant une diversité d'espèces telles que

Ampelodesmos mauritanicus, *Anthyllis montana*, *Artemisia atlantica*, *Berberis hispanica*, *Blackstonia perfoliata*, *Brachypodium* sp., *Bupleurum montanum*, *Bupleurum spinosum*, *Cerastium glomeratum*, *Crataegus laciniata*, *Dactylis glomerata*, *Festuca atlantica*, *Helichrysum stoechas*, *Inula montana*, *Origanum glandulosum*, *Phlomis bovei*, *Poa bulbosa*, *Potentilla caulescens* var. *djurdjurae*, *Prunus prostrata*, *Rhamnus alpina*, *Rhamnus lycioides*, *Scabiosa columbaria*, *Scabiosa crenata*, *Senecio perralderianus*, *Teucrium chamaedrys*, *Teucrium kabylicum*, *Teucrium podium*, *Trifolium campestre*, *Trifolium stellatum* et *Xeranthemum inapertum*.

ISE est une chênaie caducifoliée à *Q. canariensis* et de *Q. afares*. La strate arbustive comprend notamment *Acer obtusatum* en abondance, avec une présence moins marquée de : *A. campestre*, *Sorbus torminalis* et *Prunus avium*. Un grand nombre de ces arbres servent de support à *Hedera helix* bien présent dans les zones ombragées. La strate arbustive est bien fournie, comprenant des espèces telles que *Coriaria myrtifolia*, *Crataegus laciniata*, *Ilex aquifolium*, *Rhamnus alpina*, *R. lycioides*, *Rosa sicula*, *Rubus incanescens* et *R. ulmifolius*. La couche herbacée est également diversifiée, avec la présence de nombreuses espèces telles que *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*, *Dactylis glomerata*, *Dianthus caryophyllus*, *Erodium cicutarium*, *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*.

2.1.6. Climat

La synthèse climatique pour TAK et ISE repose sur la donnée de la station météorologique de Béjaïa (annexe 1). Les températures et les précipitations ont été ajustées pour tenir compte de l'altitude moyenne de chaque zone d'étude, en appliquant les corrections proposées par Seltzer (1946). Pour TAK, la température moyenne annuelle est de 10 °C, avec août comme mois le plus chaud (19,22 °C) et janvier comme mois le plus froid (1,35 °C), et les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à 1409,44 mm, avec un quotient pluviothermique de 270,43 mm. ISE présente une température moyenne annuelle est de 8,93 °C, avec août comme mois le plus chaud (18,38 °C) et janvier comme mois le plus froid (0,95 °C), et le cumul moyen des précipitations annuelles est d'environ 1 459,57 mm. Le climat est de type méditerranéen avec des hivers frais et pluvieux, des étés chauds et secs et une période sèche allant de juin à fin août. Les deux aires d'échantillonnages se situent dans l'étage bioclimatique hyper-humide à hiver frais.

2.1.7. Etat des forêts d'étude

Les deux monts d'étude sont soumis à une activité anthropique élevée : le surpâturage y est une pratique ancestrale et de nombreux arbres montrent des cicatrices de feux, indiquant une forte activité d'incendie, notamment en basses altitudes où la végétation est réduite à un maquis dégradé, voire à une broussaille. Des coupes illégales sont souvent constatées dans les zones boisées accessibles. Par ailleurs, si quelques cas d'arbres en déclin aient été observés, le taux de dépérissement reste très faible.

2.2. Méthodes

2.2.1. Echantillonnage et préparation des échantillons

La présente étude repose sur l'approche dendrochronologique. Une campagne d'échantillonnage a été réalisée en août 2016 au niveau des deux sites d'étude : vingt arbres sains, exempts de cicatrices ou d'anomalies visibles, ont été sélectionnés et deux carottes ont été prélevées sur des positions opposées de chaque sujet des trois espèces étudiées à l'aide d'une tarière de Pressler (Figure 2.4), souvent à une hauteur de référence de 1,30 m, où le tronc est plus droit et les cernes moins sujets à la déformation (Delwaide et Filion, 2010) et en veillant à ce que le nombre de cernes soit suffisant (minimum 50) pour permettre une interdatation des échantillons (Touchan *et al*, 2008, 2010). Pour les arbres légèrement inclinés, les carottes ont été prélevées de manière à éviter le bois de réaction, sur une position perpendiculaire à l'axe d'inclinaison (Fritts, 1976). Les carottes ont été immédiatement placées dans des étuis en papier pour faciliter leur transport et minimiser le risque de détérioration entre le terrain et le laboratoire. Les cavités résultant du carottage ont été colmatées avec du mastic à bois pour assurer une protection optimale des arbres échantillonnés.



Figure 2.4. Carottage d'un cèdre de l'Atlas à TAK (photo : S. Slimani).

Les échantillons prélevés ont été laissés sécher à l'air libre, puis fixés sur des supports en bois rainurés. Enfin, les échantillons ont été poncés avec du papier de verre grossier, puis progressivement avec des papiers de plus en plus fins pour améliorer la lisibilité des cernes de croissance annuels (Yamaguchi et Brunstien, 1991) (Figure 2.5).



Figure 2.5. Carottes poncées après montage sur des supports en bois rainurés : en haut, carotte du cèdre de l'Atlas, caractéristique des résineux, avec un cerne dont la limite est déterminée par un bois d'été sombre ; en bas, carotte du chêne zéen, caractéristique des feuillus caducifoliés avec un bois à zones poreuses (gros vaisseaux conducteurs du bois de printemps) suivies de zones compactes (bois d'été) (photo : S. Slimani).

2.3. Analyse statistique

2.3.1. Etablissement des chronologies maîtresses

2.3.1.1. Contrôle statistique de la qualité de l'interdatation

Dans notre étude, l'année de formation du dernier cerne sous l'écorce a été formé en 2016. Ce dernier n'est pas complet, car la campagne d'échantillonnage a eu lieu en été, avant la fin de la saison de la croissance. Ainsi, le dernier cerne considéré dans notre analyse dendrochronologique est celui formé en 2015.

Initialement, une datation visuelle des carottes a été réalisée en comptant simplement à rebours à partir du dernier cerne considéré en direction de la moelle. Ensuite, les échantillons ont été interdatés pour garantir un alignement correct des séries de croissance (Lebourgeois et Mérian, 2012). L'interdatation est essentielle pour vérifier la synchronisation des séries chronologiques, corriger d'éventuelles erreurs de datation et attribuer à chaque cerne de croissance l'année précise de sa formation (Douglas, 1946 ; Fritts, 1976). Cette procédure s'est appuyée sur la méthode skeleton plot, une technique de représentation schématique qui repose sur l'identification de cernes diagnostiques (caractéristiques) selon les techniques classiques largement utilisées en dendrochronologie, telles que décrites par Douglas (1946) et Stokes et Smiley (1996).

Les largeurs des cernes de croissance ont été mesurées de la moelle vers l'écorce en utilisant une table de mesure semi-automatique LINTAB associée à un logiciel enregistreur automatique TSAP-Win, avec une précision de 0,01 mm, en veillant à orienter correctement l'échantillon afin que l'axe de mesure soit perpendiculaire à la limite du cerne mesuré (Delwaide et Filion, 2010).

Par ailleurs, le contrôle statistique de la qualité de l'interdatation des échantillons obtenus des trois essences forestières étudiées a été réalisé à l'aide du programme Cofecha (Holmes, 1983). Ce programme vérifie la fiabilité de l'interdatation en corrélant les segments successifs d'une série de croissance donnée avec une chronologie de référence établie à partir des autres séries de croissance. La largeur du segment de cernes de croissance analysé est fixé à 50 ans, avec un recouvrement de 50 % à chaque étape de vérification (les segments successifs sont décalés de 25 ans).

2.3.2. Standardisation des chronologies brutes

La standardisation nous permet de minimiser les effets et tendances non liés à la variation climatique (Cook, 1985), tels que les signaux liés à l'âge de l'arbre, à la compétition et à d'éventuelles perturbations (Fritts, 1976). C'est une étape cruciale dans le traitement des séries chronologiques (Schulman, 1954) pour des résultats plus significatifs et qui reflètent seulement le facteur étudié.

La standardisation a été réalisée à l'aide du programme ARSTAN (Cook, 1985 ; Cook et Holmes, 1999) en utilisant une fonction de lissage cubique spline 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 calculés en divisant chaque valeur d'épaisseur de cerne par la valeur correspondante sur la courbe de croissance théorique. Cette étape nous permet de transformer les mesures de largeurs de cernes en indices de croissance de dimension uniforme, indépendamment des différences d'âge et de croissance entre les arbres, ce qui nous donne des chronologies caractérisées par une variabilité relativement homogène dans le temps, avec une moyenne proche de un (Fritts, 1976). Enfin, ce programme utilise un modèle autorégressif basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC, Akaike information criterion) pour éliminer l'autocorrélation résiduelle dans les séries détendues.

Le signal climatique contenu dans les chronologies établies pour chaque espèce forestière étudiée a été caractérisé en utilisant les statistiques suivantes : la sensibilité moyenne, l'autocorrélation d'ordre 1, l'intercorrélation moyenne, la variance du premier vecteur propre et le signal exprimé dans la population (EPS : *expressed population signal*).

La sensibilité moyenne mesure 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, quantifiant l'effet de la persistance des conditions qui ont conduit à la formation du cerne de l'année $t-1$ sur la formation du cerne de l'année suivante (Lebourgeois et Mérian, 2012).

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

La variance du premier vecteur propre exprime le pourcentage le plus élevé de la variance totale d'un ensemble de données. Comme les séries sont standardisées, la variance du premier vecteur propre est relative à la qualité du signal climatique contenu dans les cernes de croissance (Slimani, 2014).

Le signal exprimé dans la population (EPS) est un paramètre important pour évaluer 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, généralement accepté pour garantir une bonne représentativité de la chronologie moyenne (Wigley *et al.*, 1984).

La standardisation de la donnée brute produit trois séries ajustées (Standard, Résiduelle et ARSTAN). L'analyse cerne-climat repose sur la chronologie qui présente les meilleures valeurs des paramètres statistiques suscités.

2.3.3. Analyse de la croissance radiale

2.3.3.1. Evolution de l'indice de croissance

L'évolution de l'indice de croissance a été étudiée en analysant les figures des chronologies standardisées établies pour les trois espèces échantillonnées, accompagnée d'une courbe de tendance d'une moyenne mobile de 10 ans.

Par ailleurs, la similarité entre les patrons de croissance des espèces étudiées a été appréhendée via une analyse de la corrélation entre les trois chronologies standardisées retenues.

2.3.3.2. Analyse des événements extrêmes

L'analyse des événements extrêmes repose sur le *skeleton plot* de l'interdation sous Cofecha (Annexe 6 et 7). Les trois écarts extrêmes supérieurs et inférieurs de la déviation par rapport à la moyenne sont utilisés pour définir les cernes diagnostiques minces et larges respectivement : les cernes minces sont caractéristiques des années sèches et les cernes larges reflètent les conditions climatiques des années humides.

Pour une meilleure appréciation de la relation entre la croissance radiale et les événements climatiques extrêmes, les chronologies établies sont considérées au seuil EPS de 0,85.

2.3.3.3. Evolution de la sensibilité moyenne des arbres

Selon Fritts (1976), la sensibilité moyenne mesure le changement relatif moyen entre les cernes annuels adjacents, fournissant une estimation de l'impact des fluctuations climatiques sur la largeur des cernes à court terme. La sensibilité (S_x) est calculée en considérant la différence relative en valeur absolue entre deux indices de croissance successifs selon la fonction suivante :

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

Où I_t et I_{t+1} sont les valeurs des épaisseurs moyennes des cernes adjacents considérés.

Pour estimer la variabilité spatiotemporelle de la sensibilité moyenne (SM_x), des calculs ont été effectués sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année.

Pour une meilleure appréciation de la relation entre la sensibilité des arbres carottés et la variabilité climatique de la région d'étude, cette analyse a été réalisée sur les chronologies résiduelles au seuil EPS de 0,85.

2.3.4. Relation cerne-climat

L'analyse de la relation cerne-climat a été réalisée en utilisant la donnée climatique instrumentale mensuelle de la station météorologique de Béjaïa (Annexe 1 et 2). Les meilleures corrélations entre l'indice de la croissance et les précipitations totales et les températures moyennes mensuelles sont celles obtenues sur la période 1978-2013 : c'est la période d'analyse retenue dans le cadre de cette étude.

Des corrélations saisonnières ont été réalisées avec le programme Seascorr (Meko *et al.*, 2011). L'exécution de ce programme exige l'entrée de trois fichiers de données : l'indice de croissance (donnée dendrochronologique) et les séries de précipitations, en tant que paramètre principal, et des températures moyennes mensuelles, en tant que paramètre secondaire (donnée climatique).

Seascorr fournit les meilleures corrélations obtenues entre l'indice de croissance (variable dépendante) et les deux variables climatiques suscitées (variables indépendantes) sur différents périodes de l'année, allant de un à 12 mois.

Par ailleurs, pour tester la stabilité temporelle de ces corrélations, en plus de la corrélation calculée sur la période totale d'analyse, ce programme calcule des corrélations partielles où cette période est subdivisée en deux sous-périodes. La corrélation est considérée temporellement stable s'il n'y a pas de différence significative entre les deux sous-périodes d'analyse. Seules les périodes affichant une corrélation stable peuvent être proposées pour l'établissement d'un modèle de reconstitution dendroclimatique (Meko *et al.*, 2011).

Chapitre III. Résultats et discussion

3.1. Établissement des chronologies maîtresses

3.1.1. Contrôle statistique de la qualité de l'interdatation

Les résultats de l'analyse statistique de l'interdatation sous Cofecha des chronologies maîtresses des trois espèces étudiées sont consignés dans le tableau 3.1 et les annexes 1, 2 et 3. La figure 3.1 fournit quant à elle la tendance de l'évolution des trois chronologies brutes dans le temps.

Tableau 3.1. Principales caractéristiques des chronologies maîtresses établies (TAK : cédraie de Takoucht, ISEQC : chêne zéen du mont Issek, ISEQA : chêne afarès du mont Issek).

Paramètres statistiques	Espèce		
	TAK	ISEQC	ISEQA
Nombre d'arbres	20	18	18
Nombre de carottes datées	40	34	34
Longueur de la chronologie maîtresse	1565 - 2015 (451 ans)	1623 - 2015 (393 ans)	1583 - 2015 (433 ans)
Longueur moyenne des séries individuelles	211,7 ans	206,3 ans	177,6 ans
Segments avec de possibles erreurs de datation	18	00	05
Nombre de cernes absents	18	00	00
Sensibilité moyenne	0,29	0,21	0,19
Corrélation entre les séries individuelles (r)	0,54	0,57	0,55

La datation a été plus facile sur le cèdre de l'Atlas (TAK), un résineux, avec une structure simple des cernes de croissance, facilement lisibles sous une loupe binoculaire, que sur les deux chênes caducifoliés (ISEQC et ISEQA). En effet, les 40 carottes (20 arbres) échantillonnées à TAK ont été, au moins partiellement, datées avec succès, alors que cette procédure n'a été concluante que sur 34 carottes (18 arbres) à ISEQC et ISEQA.

La plus longue chronologie a été établie à TAK, couvrant une période de 451 ans (1565- 2015), avec notamment 12 arbres présentant des séries pluricentennaires (supérieures ou égale à 200 ans). La carotte TAK06B détient la plus longue série, couvrant 451 ans, tandis que la plus courte, la carotte TAK16B, ne couvre que 76 ans. La chronologie de référence la plus courte a été établie pour ISEQC. Elle couvre une période de 393 ans (1623-2015) et la moitié des arbres (neuf) carottés ont fourni des séries pluricentennaires. La série la plus longue, trouvée dans la carotte 10B, couvre 393 ans, tandis que la plus courte, dans la carotte 13B, ne couvre que 70 ans. La chronologie de ISEQA couvre une période de 433 ans (1583-2015), des chronologies pluricentennaires établies sur sept arbres. La carotte 12B détient la série la plus longue, datant de 433 ans, tandis que la carotte 08B ne couvre que 88 ans. Par ailleurs, la longueur moyenne des séries individuelles est plutôt comparables entre les trois chronologies établies (212 ans pour TAK, 206 ans pour ISEQC et 178 ans pour

ISEQA). Ainsi, ces longueurs moyennes des chronologies établies permettent une analyse de la croissance radiale sur des périodes dépassant le siècle.

Tous les segments avec de possibles erreurs de datation signalés par Cofecha ont été vérifiés sur le bois. Le nombre plus ou moins élevé de ces erreurs possibles signalés pour TAK est plutôt dû aux différences de croissances affichées par les arbres carottés, qui couvrent le gradient altitudinal le plus fort, contrairement aux arbres de ISEQC et ISEQA, carottés sur des aires plus étroites, affichant, par conséquent, un meilleur synchronisme entre les séries individuelles.

Les autres principales caractéristiques des chronologies maîtresses offrent des perspectives plutôt différentes. TAK a enregistré 18 cernes absents, alors que ISEQC et ISEQA n'en ont enregistré aucun. Cette forte présence des cernes absents dans les chronologies du cèdre de l'Atlas a aussi été rapportée par Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) pour les cédraies des Aurès et Slimani *et al.* (2021 a) au niveau des cédraies des Aurès et du Djurdjura. Nos résultats reflètent une plus forte sensibilité du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique par rapports aux deux chênes caducifoliés échantillonnés. Ce constat est d'autant plus confirmé par les valeurs de la sensibilités moyennes, de loin plus élevée chez le cèdre (0,29) que chez les chênes étudiés (0,21 pour ISEQC ; 0,19 pour ISEQA). En effet, Ruiz-Benito *et al.* (2017) soulignent le fait que les conifères sont généralement plus sensibles aux changements climatiques que les feuillus. D'ailleurs les résineux sont pour la plupart sensibles à la sécheresse atmosphérique que les feuillus, qui possèdent des stratégies d'évitement pour échapper à un déficit hydrique important comme la chute précoce des feuilles (Breda *et al.*, 2021). Par ailleurs, cette différence peut aussi être expliquée par la variation de l'humidité atmosphérique entre les deux sites d'étude. En effet, faisant face à la Méditerranée, les peuplements du mont Issek (ISEQC et ISEQA) bénéficient davantage de l'humidité de l'air marin que la cédraie de Takoucht. En outre, entre les deux feuillus, c'est l'afarès qui a enregistré la plus faible valeur de la sensibilité moyenne. Cette différence peut être expliquée par le phénomène de l'édaphisme. En effet, le chêne zéen prospère sur les terrains calcaires ainsi que siliceux, il ne pousse bien que sur des sols profonds et perméables (Boudy, 1950), et préfère les sols frais, pas très filtrants, de sorte qu'il pousse en terrain siliceux et préfère les grès numidiens (Ksontini, 1996 *in* Akli, 2022). Contrairement au chêne afarès qui s'épanouit et exige des sols non calcaires peu colonisés et des sols dégradés par les incendies et il résiste bien à la chaleur et au froid (Boudy, 1950; Maire, 1961), ce qui le rend moins sensible à la variabilité climatique, notamment à la sécheresse.

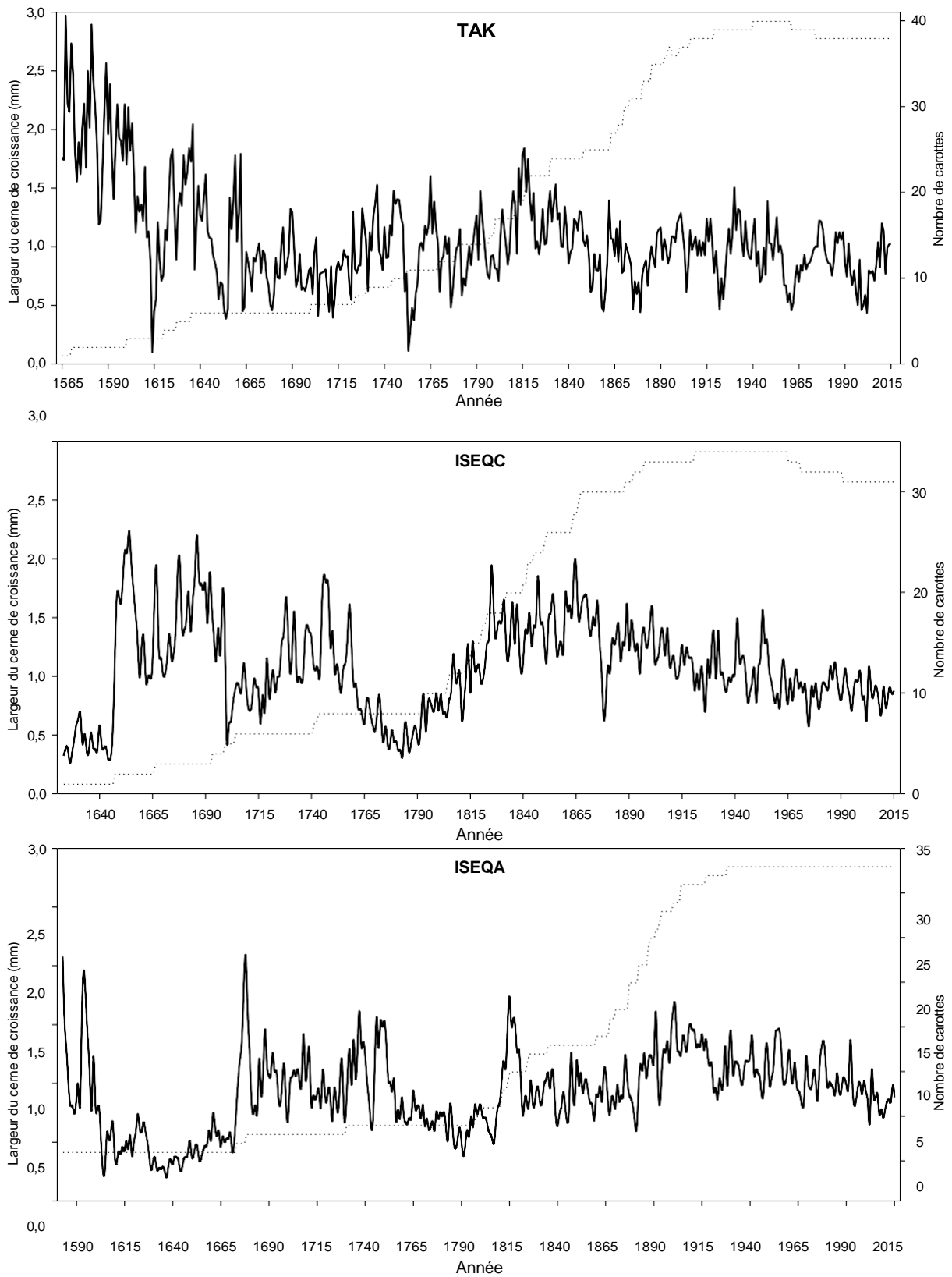


Figure 3.1. Chronologies maîtresses brutes pour les trois espèces échantillonnées. La courbe continue représente la largeur du cerne de croissance et celle en pointillé le nombre d'échantillons.

Par ailleurs, il y a lieu de souligner que notre cédraie d'étude (TAK) présente un coefficient de sensibilité moyenne plutôt comparable à ceux signalés par Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) et Slimani *et al.* (2021a) pour les cédraies des Aurès qu'aux relativement faibles coefficients mentionnés par Slimani (2014) au niveau de différents peuplements de la cédraie du Djurdjura. Ceci pourrait être attribuées au fait que l'aire d'échantillonnage des peuplements de cèdre étudiés par Slimani (2014) se localisent dans des zones plutôt plus humides que celle de TAK.

La corrélation entre les séries individuelles sont plus ou moins proches. Cependant, ISEQC présente la valeur la plus forte ($r = 0,57$), suivi par ISEQA ($r = 0,55$) et, enfin, par TAK qui affiche la valeur la plus faible ($r = 0,54$). Ceci pourraient être expliqué par le fait que les sujets carottés du chêne zéen (ISEQC) et du chêne afarès (ISEQA) se trouvent dans une aire plus homogène, avec notamment une dénivelée plus faible que celle caractérisant l'aire d'échantillonnage de TAK.

La figure 3.1 présente les courbes des chronologies brutes des 3 espèces étudiées. Elles sont caractérisées par une fluctuation de très grande amplitude. Ces courbes sont celles des mesures de l'épaisseur de cernes de croissance : n'ayant subi aucun ajustement, elles incluent toutes les fluctuations et tendances résultant de la combinaison de plusieurs facteurs influençant la croissance radiale. Ces effets sont dus au climat, mais aussi à l'âge, aux perturbations aussi bien naturelles qu'anthropiques, etc. (Cook, 1985). Or, comme signalé dans le chapitre précédant, pour bien appréhender la relation cerne-climat, les effets non liés à la variabilité climatiques doivent être minimisés, voire éliminés. Ainsi, la procédure de la standardisation des chronologies brutes est appliquée pour atténuer les signaux indésirables et mettre en exergue l'effet du signal climatique enregistré dans les cernes de croissance.

3.1.2. Standardisation des chronologies brutes

Les tableaux ci-après présentent les principales statistiques des chronologies standardisées. La lecture des résultats montre que la chronologie résiduelle présente les meilleures caractéristiques pour une étude dendroclimatique.

Entres autres, le tableau 3.2 montre ces séries résiduelles affichent les plus forts coefficients de sensibilité moyenne, donc de la meilleure sensibilité des arbres sondés à la variabilité climatique. Leurs écart type est le plus faible, reflétant une plus faible dispersion de l'indice de croissance.

Par ailleurs, ces chronologies sont caractérisées par un coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 presque nul. Ceci justifie le haut degré d'élimination de la rémanence des conditions antérieures de croissance (effet de la formation du cerne de l'année $t-1$ sur la mise en place du cerne de l'année t), qui est toujours persistante dans les chronologies STD et ARS (valeurs du coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 proches de un).

Tableau 3.2. Principales statistiques des chronologies standardisées pour TAK, ISEQC et ISEQA (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = arstan).

Paramètre	Chronologie								
	TAK			ISEQC			ISEQA		
	STD	RES	ARS	STD	RES	ARS	STD	RES	ARS
Type de chronologie									
Moyenne	0,97	0,98	0,96	0,98	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99
Sensibilité moyenne	0,20	0,22	0,20	0,15	0,18	0,15	0,15	0,17	0,15
Ecart type	0,25	0,19	0,23	0,22	0,16	0,19	0,20	0,16	0,20
Autocorrélation d'ordre 1	0,54	0,00	0,50	0,65	0,08	0,48	0,67	0,11	0,47

Le tableau 3.3 montre que ce sont aussi les chronologies résiduelles qui enregistrent les plus fortes corrélations moyennes, ainsi que les valeurs du premier vecteur propre les plus élevées, reflétant un meilleur signal climatique enregistré dans les cernes de croissance.

Tableau 3.3. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) sur l'intervalle commun des chronologies individuelles pour TAK, ISEQC, ISEQA.

Chronologie	Corrélation moyenne			Période commune	Nombre d'années	Nombre d'arbres	Variance du 1 ^{er} VP (%)
	Toutes les carottes	Entre arbres	Intra-arbres				
TAK	ARS	0,20	0,19	1888-2015	128	18	23,64
	RES	0,28	0,28				0,47
ISEQC	ARS	0,30	0,31	1868-2015	148	16	35,24
	RES	0,37	0,37				0,63
ISEQA	RES	0,28	0,27	1905-2015	111	18	31,37
	ARS	0,34	0,34				0,60

Ainsi, au vu de ces résultats, l'analyse de l'évolution de l'indice de croissance dans le temps reposera sur les chronologies résiduelles (Figure 3.2).

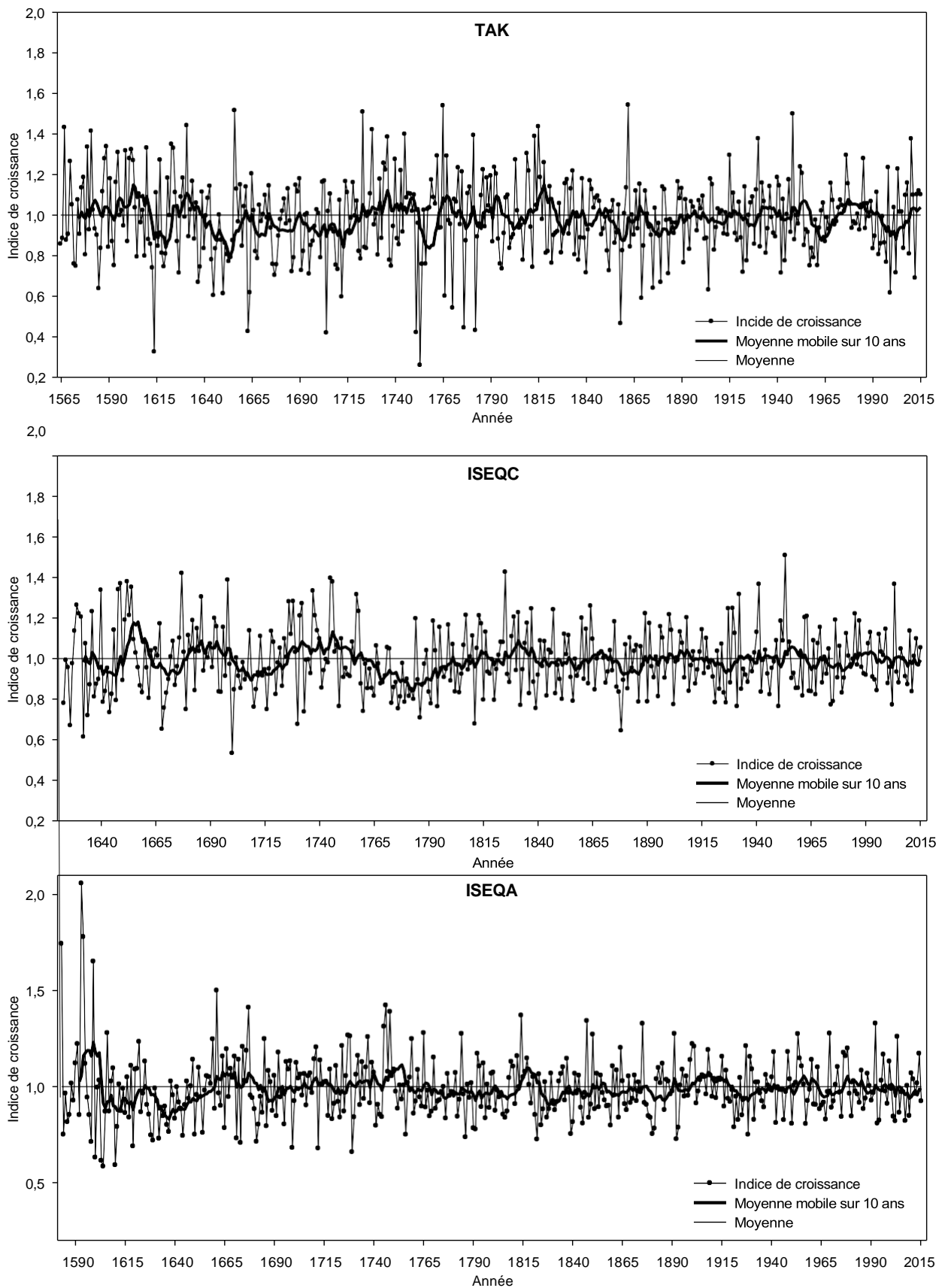


Figure 3.2. Chronologies résiduelles pour les trois espèces échantillonnées accompagnées de

courbes de tendance d'une moyenne mobile de 10 ans.

Par ailleurs, pour une appréhension plus robuste de la relation entre la croissance radiale et la variabilité climatique, les analyses ultérieures reposeront sur les chronologies résiduelles au seuil EPS 0,85 (Wigley *et al.*, 1984). A ce seuil, la chronologie de TAK couvre la période 1724- 2015, celle de ISEQC la période 1767-2015) et celle de ISEQA la période 1848-2015 (Tableau 3.4).

Tableau 3.4. Longueur des chronologies résiduelles au seuil EPS de 0,85.

	Période totale (années)	EPS > 0,85	
		Période	Nombre d'arbres
TAK	1565-2015 (451)	1724-2015	04
ISEQC	1623-2015 (393)	1767-2015	05
ISEQA	1583-2015 (433)	1848-2015	09

3.2. Analyse de la croissance radiale

3.2.1. Evolution de l'indice de croissance

Les trois espèces étudiées affichent une grande variabilité de la croissance radiale dans le temps (Figure 3.2). Néanmoins, un examen global de l'évolution de l'indice de croissance des trois chronologies résiduelles fait ressortir des différences entre le résineux (cèdre de l'Atlas) et les deux feuillus caducifoliés (chênes zéen et afarès) et entre ces deux derniers. En effet, c'est l'indice de croissance du cèdre (TAK) qui a enregistré la plus forte variabilité dans le temps, suivie par celle du chêne zéen (ISEQC) et, enfin, celle du chêne afarès (ISEQA). Ces différences seraient principalement dues à la sensibilité des trois espèces à la variabilité climatique. Ceci corrobore les résultats de la sensibilités moyenne des trois espèces, dont la valeur la plus forte est enregistrée par le cèdre de l'Atlas et la plus faible par le chêne afarès.

Les différences entre les patrons de croissance des espèces étudiées sont davantage confirmées par les corrélations affichées entre les trois chronologies résiduelles : comme rapporté précédemment, les différences sont plus importantes entre le résineux et les deux chênes caducifoliés, dont les corrélations affichent des coefficients d'une valeur plutôt faible (TAK vs. ISEQC : $r = 0,11$, $p = 0,038$; TAK vs. ISEQA : $r = 0,16$, $p = 0,001$). Ce sont les indices de croissance des deux chênes étudiés qui ont enregistré la plus forte corrélation (ISEQC vs. ISEQA : $r = 0,39$, $p = 0,000$). Ceci est dû au fait que les deux espèces sont du même genre, et qu'elles sont échantillonnées dans un même site (Issek) et sur deux aires d'échantillonnages qui se chevauchent. Par ailleurs, il y a lieu de signaler que malgré ces différences, toutes les corrélations sont significatives ($p < 0,05$).

TAK est marqué par une légère prépondérance des indices supérieurs à la moyenne. En effet, sur la période de 451 ans (1565-2015), cette chronologie a enregistré 222 indices de croissances

inférieurs et 229 supérieurs à la moyenne. Au contraire, les chronologies des deux feuillus sont

largement dominées par des indices de croissance inférieurs à la moyenne : sur une période de 393 ans (1623-2015), ISEQC a enregistré 208 indices inférieurs et 185 indices supérieurs à la moyenne ; sur une période de 433 ans (1583-2015), ISEQA a enregistré 234 indices inférieurs et 199 indices supérieurs à la moyenne.

Les indices de croissances extrêmes affichent aussi des différences notables entre les trois chronologies. Correspondant aux années très humides, les trois indices de croissance les plus larges, cités en ordre décroissant, ont été enregistrés en 1862, 1765 et 1656 à TAK, en 1953, 1825 et 1677 à ISEQC et 1593, 1594 et 1583 à ISEQA. Les trois indices les plus faibles, correspondants aux années plutôt très sèches, ont été enregistrés en 1753, 1614 et 1704 à TAK, en 1700, 1632 et 1878 à ISEQC et en 1604, 1610 et 1603 à ISEQA. La plus longue série d'années successives avec un indice de croissance supérieur à la moyenne, correspondant à une période favorable à la croissance radiale, a été enregistré sur les périodes 1972- 1978 (sept ans) à TAK, 1651-1656 et 1724-1729 (six ans) à ISEQC et 1812-1818 (sept ans) à ISEQA ; la plus longue série d'années successives avec un indice de croissance inférieur à la moyenne, reflétant un épisode défavorable à la croissance, a été enregistré sur les périodes 1954-1962 (neuf ans) à TAK, 1773-1783 (11 ans) à ISEQC et ces trois séries 1631-1637, 1678-1684, 1801-1807 (sept ans) pour chaque série à ISEQA.

Ces différences seraient principalement dû aussi bien aux facteurs spécifiques des trois essences forestières étudiées qu'aux caractéristiques de site et de peuplements considérés.

Les courbes de tendance d'une moyenne mobile de 10 ans fournissent des informations complémentaires intéressantes. En plus du signal de haute fréquence (tendance interannuelle de croissance) déjà discuté, elles mettent en évidence le signal de moyenne fréquence (variabilité de la croissance sur plusieurs dizaines d'années dans notre cas) (Lebourgeois et Mérian 2012). Nos chronologies étant standardisées, ces signaux sont principalement dus à la variabilité climatique.

Les trois courbes de tendance expriment la forte variation de la croissance ayant caractérisé les trois espèces étudiées au cours des quatre derniers siècles et demi, reflétant ainsi la forte variabilité climatique qui a régné dans la région d'étude au cours de cette période. Notre cédraie (TAK) a enregistré une forte variabilité de la croissance radiale entre la deuxième moitié du XVI^e siècle à la deuxième moitié du XVII^e siècle et entre la deuxième moitié du XVIII^e siècle et le début du XIX^e siècle. Après une période de relative stabilité de la croissance radiale qui s'est étalée jusqu'à la fin de la première moitié du XX^e siècle, caractérisée par une variabilité de la croissance plutôt modérée, une tendance nette vers un autre épisode de forte variabilité a été déclenché à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle. Une tendance similaire a été rapportée par Kherchouche *et al.*, (2012, 2013) pour les cédraies des Aurès et par Slimani (2014) pour les cédraies des Aurès et du Djurdjura. Néanmoins, une nette plus forte variabilité de la croissance radiale est enregistrée au niveau des cédraies des Aurès, subissant le climat semi-aride de l'Atlas saharien, par rapport aux cédraies du Djurdjura et de notre cédraie de la Kabylie des Babors, qui, elles, bénéficient des conditions

climatiques plus clémentes régnant dans les parties centrale et orientale de l'Atlas tellien.

Dans l'ensemble, ces mêmes tendances de forte et faible variabilité de la croissance radiale sont aussi exprimées par les courbes des moyennes mobiles de ISEQC et ISEQA. Cependant, le signal affiché par ces deux feuillus est nettement inférieur à celui décrit pour le cèdre de l'Atlas, notamment chez le chêne afarès (ISEQA), qui, comme souligné précédemment, est la moins sensible des trois essences forestières étudiées à la variabilité climatique.

3.2.2. Analyse des événements extrêmes

L'analyse des événements extrêmes est basée sur les années caractéristiques à cernes minces, correspondant aux années sèches, et à cernes larges, correspondant aux années humides pour les trois espèces, selon le skeleton plot de l'output de Cofecha (Annexes 4 et 5).

Les résultats des événements extrêmes affichent des différences notables entre les trois espèces étudiées, notamment entre le cèdre de l'Atlas (TAK) et les deux chênes caducifoliés (ISEQC, ISEQA). Ceci peut être expliqué, comme mis en évidence ci-dessus, par la différence de la réponse de ces essences forestières à la variabilité climatique. A titre d'exemple, l'année 2012 a enregistré un cumul de précipitation largement supérieur à la moyenne 1473,49 mm à Béjaïa.

Néanmoins, ces précipitations étaient très irrégulières, avec notamment 61 % des précipitations hivernales et printanières tombées au mois de février, qui a dépassé sa moyenne mensuelle de 350 %. Slimani *et al.* (2021a) ont constaté un taux de mortalité de 15 % lors de cette année au niveau des cédraies algériennes les plus septentrionales. Cet événement climatique a induit un cerne mince sur le cèdre de l'Atlas (TAK), qui, comme mentionné précédemment, est un résineux sensible à la variabilité climatique. En outre, le mont Takoucht est un site caractérisé par une forte pente et un sol bien drainé. Au contraire, ISEQC et ISEQA n'ont pas produit un cerne diagnostique. Ceci serait principalement lié à la compensation due aux conditions plus humides régnant sur ce versant ubac du mont Issek, faisant face à la Méditerranée. Ainsi, cette année 2012 a plutôt enregistré une sécheresse agricole, qui fait référence aux situations où l'humidité du sol et les réserves en eau deviennent insuffisantes pour satisfaire les besoins des cultures et ceux du bétail dans une région donnée (OSS, 2008) ; pas une sécheresse météorologique sévère, vu la pluviométrie enregistrée dans la région cette année.

La chronologie de TAK a enregistré 61 cernes mince et 115 cernes large (presque le double). Les deux caducifoliés affichent un écart moins important entre les nombres d'événements extrêmes : ISEQC a enregistré 38 cernes mince et 98 cernes larges ; ISEQA affiche 58 cernes minces et 118 cernes larges. Ces résultats relativement proches entre les deux feuillus (ISEQC et ISEQA) sont dus au fait que les deux aires d'échantillonnages se chevauchent sur le même site (mont Issek).

La prépondérance des événements à cernes larges reflète les conditions plus ou moins humides qui règnent dans la région d'étude en particulier et dans les Babors en général. D'ailleurs sur la période commune couverte par les trois chronologies (1724-2015), les événements extrêmes enregistrés par les trois espèces marquent beaucoup plus les cernes diagnostiques larges, qui représentent les périodes humides, avec 16 années (1728, 1740, 1746, 1747, 1748, 1793, 1810, 1847, 1864, 1901, 1915, 1917, 1930, 1941, 1969 et 1992), alors que les cernes diagnostiques minces communs, qui représentent les années sèches, n'ont été observés que sur neuf années (1858, 1859, 1879, 1925, 1958, 1965, 1994, 2002 et 2009). Les événements secs survenus dans les années 1879, 1994, 2002 et 2009 ont aussi été rapportés dans le Djurdjura par Slimani (2014) et dans la région des Aurès par Kherchouche *et al.* (2012, 2013) et Slimani (2014). Le nombre relativement faible de cernes diagnostiques communs entre nos chronologies, d'une part, et entre ces dernières et celles établies pour le Djurdjura et les Aurès par Kherchouche *et al.* (2012, 2013) et Slimani (2014) est principalement dû à l'implication dans notre étude des chronologies de feuillus, qui sont moins sensibles à la variabilité climatique que les résineux. En effet, la plupart des événements extrêmes identifiés dans notre cédraie d'étude (TAK) ont été enregistrés dans les chronologies des cédraies du Djurdjura et des Aurès.

Il y a lieu de signaler le nombre important de cernes minces communs à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle, confirmant ainsi une tendance du retour d'un épisode de sécheresses récurrentes. Cependant, les dernières années sont caractérisées par un bon nombre d'années caractéristiques, aussi bien de cernes minces que larges, ce qui témoigne d'une période de forte variabilité climatique reflétant une tendance vers un climat de plus en plus imprévisible, avec des épisodes aussi bien de sécheresse récurrentes et de phénomènes associés, à l'image des incendies, que de pluies torrentielles caractérisées par une fréquence de plus en plus élevée d'inondations.

3.2.3. Evolution de la sensibilité moyenne des arbres

La figure 3.3 présente l'évolution spatio-temporelle de la sensibilité moyenne des trois espèces étudiées (TAK, ISEQC et ISEQA).

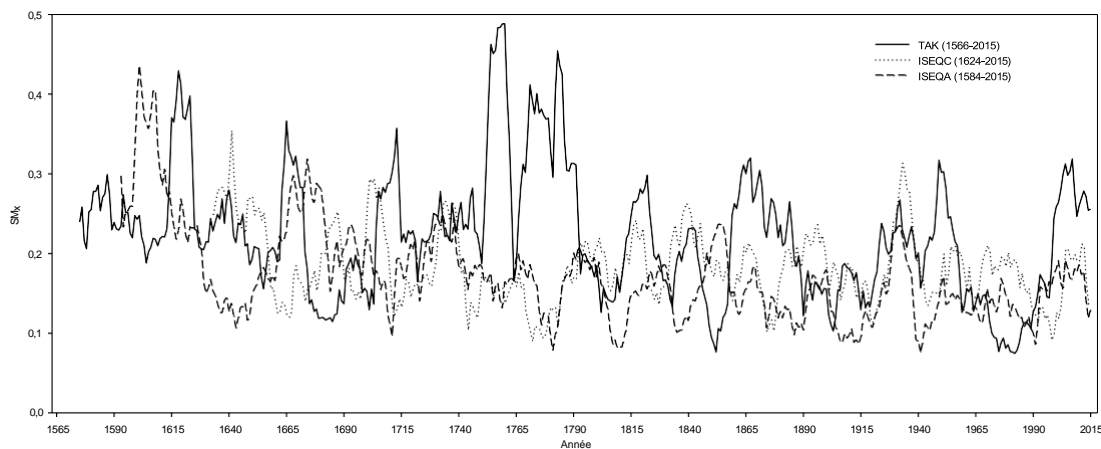


Figure 3.3. Évolution spatio-temporelle de la sensibilité moyenne (SM_x) pour la région d'étude. L'analyse repose sur les chronologies résiduelles au seuil EPS de 0,85 et les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

La sensibilité moyenne des arbres sondés affiche une grande variabilité spatio-temporelle. En effet, différents pics sont enregistrés dans le temps et des différences sont notables entre les peuplements forestiers étudiés, notamment entre le cèdre de l'Atlas (TAK) et les deux chênes caducifoliés (ISEQC et ISEQA).

L'amplitude caractérisant l'évolution de la sensibilité moyenne de TAK, reflète la grande sensibilité de ce site par rapport à ISEQC et ISEQA. Ceci pourrait principalement s'expliquer par la nature des trois espèces : étant une cédraie, donc un résineux, TAK est largement plus sensible à la variabilité climatique que les deux chênes ISEQC et ISEQA, des feuillus caducifoliés. Néanmoins, la tendance globale décrite par les trois courbes de la sensibilité moyenne est plus ou moins similaire entre les trois espèces. Ceci reflète le signal climatique commun exprimé par ces essences forestières qui occupent deux monts adjacents.

Plusieurs pics sont mis en exergue par la courbe de la sensibilité moyenne de TAK (Figure 3.3). Les plus forts sont les deux pics enregistrés au milieu du XVIII^e siècle, suivis par un pic au début du XIX^e siècle, et un autre pic au début de la deuxième moitié du XIX^e siècle. Ce dernier pic coïncide avec un épisode de dépérissement forestier, qui a touché de plein fouet le cèdre de l'Atlas en Kabylie et dans les Aurès, suite à une sécheresse sévère et/ou un hiver rigoureux. En effet, Abdessemed (1981) signale qu'une période de sécheresse serait survenue entre 1875 et 1880,

occasionnant le dépérissement de plusieurs peuplements de cèdre de l'Atlas dans la région des Aurès. Lapie (1909) note qu'une sécheresse exceptionnelle, combinée à un hiver rigoureux, a entraîné en 1879 et 1880 la mort de peuplements entiers de cèdre de l'Atlas dans l'Aurès (Atlas saharien) et en Kabylie (Atlas Tellien).

Par ailleurs, ce pic de la sensibilité moyenne coïncide aussi avec l'insurrection de Kabylie de 1871, menée par El Mokrani et cheikh Aheddad, qui d'après Emerit (1972) ont profité des conditions misérables de la population, suite à toutes sortes de calamités, dont la sécheresse et de mauvaises récoltes, mais aussi des épizooties, des invasions de sauterelles, des épidémies, une atroce famine, etc.

D'autres pics de la sensibilité moyenne des arbres carottés ont eu lieu sur la période couvrant la deuxième moitié du XX^e siècle. En effet l'Algérie a vécu plusieurs périodes de sécheresse dont les plus intenses ont été ressenties en 1910 et en 1940 et de manière plus persistante dans les années 1975-80 ainsi qu'au début du XXI^e siècle (OSS, 2008).

Le dernier pic de la sensibilité des arbres à la variabilité climatique est enregistré aux cours des dernières décennies, marquées par une sécheresse sévère ayant caractérisé la période s'étalant entre la fin du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle, qui a aussi causé un autre épisode de dépérissement forestier en Algérie, avec une mortalité plutôt faible à modérée dans les forêts de l'Atlas tellien et élevée à très élevée dans l'Atlas saharien (Aurès) (Abdessemed, 1981 ; Bentouati, 2008 ; Touchan *et al.*, 2008 ; Khercouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014). En effet, la chronologie de TAK, la plus sensible des trois, affiche clairement cette tendance d'une sécheresse récurrente durant cette période marquée par la production d'un cerne mince au cours des années 1994, 1996, 1997, 2000 et 2002 (annexe 6). Il est, d'ailleurs, important de signaler que l'évènement extrême survenu en 2002 a été détecté dans les trois chronologies établies. A cet effet, Touchan *et al.* (2008) signale cet évènement climatique de l'an 2002 comme étant l'année la plus sèche en Afrique du Nord-Ouest depuis au moins le milieu du XV^e siècle.

La période d'analyse se termine en 2015, avec une tendance vers le déclin de la sensibilité moyenne des arbres, coïncidant avec des années plutôt humides dans la région d'étude (Slimani *et al.*, 2021a). Néanmoins, les trois dernières années (2021, 2022, 2023) ont été marquée par une sécheresse importante et le retour d'un épisode de dépérissement forestier observé dans la région d'étude même sur des espèces des plus rustiques, à l'image du chêne-liège, du chêne zéen, du chêne afarès.

3.3. Relation cerne-climat

La Figure 3.4 montre l'allure de l'histogramme de distribution de l'indice de la croissance et le résultat du test de Lilliefors (Conover, 1980 *in* Meko *et al.*, 2011), qui suggèrent que l'indice de croissance suit une distribution normale pour les trois espèces (TAK, ISEQC, ISEQA), une condition pour valider l'hypothèse de modélisation (H0 acceptée).

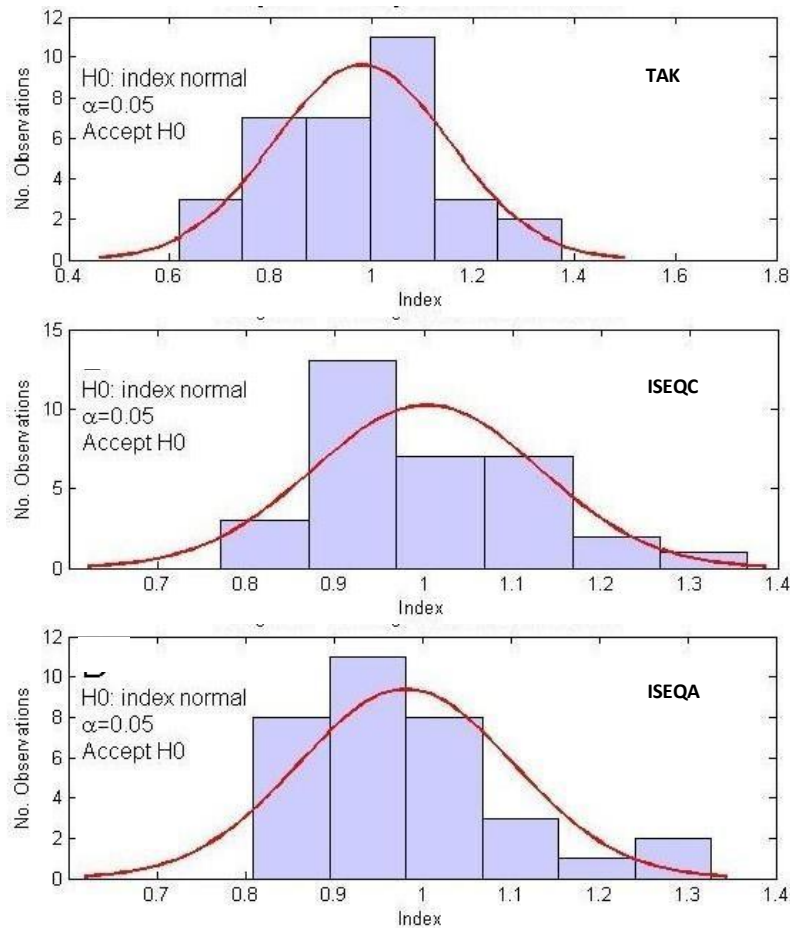


Figure 3.4. Fonction normale de densité de probabilité ajustée de l'indice de croissance et test de normalité de Lilliefors (Conover, 1980 *in* Meko *et al.*, 2011) pour les trois chronologies établies.

La figure 3.5, l'annexe 6 et le tableau 3.5 présentent les résultats des corrélations saisonnières effectuées sous Seascorr, impliquant l'indice de croissance et 24 represseurs climatiques mensuels (12 valeurs pour des précipitations et 12 valeurs de température moyenne), sur la période 1978-2013 pour les trois espèces étudiées (TAK, ISEQC, ISEQA).

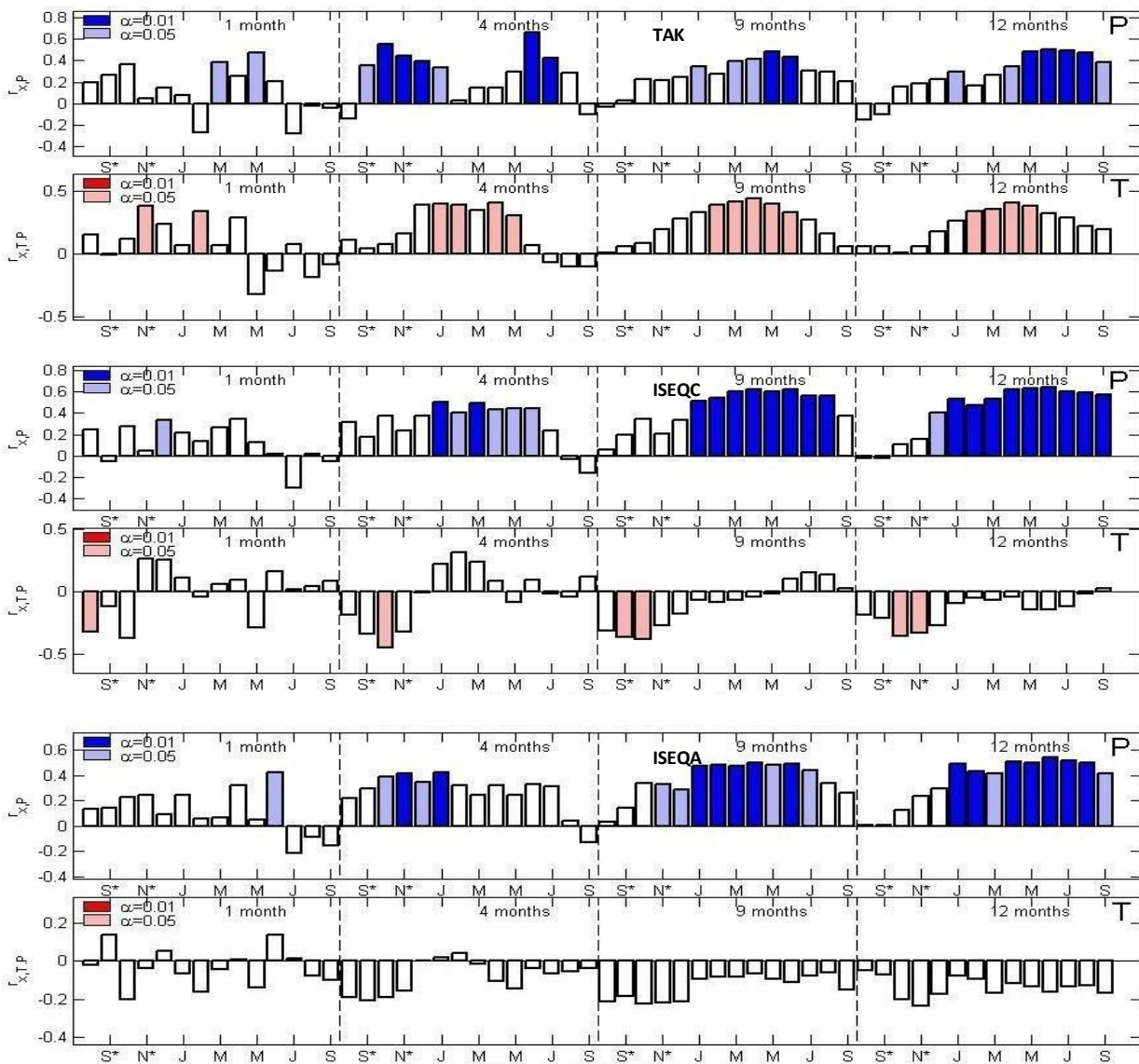


Figure 3. 5. Corrélations entre l’indice de croissance des trois chronologies établies et les variables climatiques saisonnières : en haut les corrélations avec la variable climatique primaire, les précipitations(P). En bas les corrélations avec la variable climatique secondaire, la température (T). L’astérisque (*) indique les mois de l’année $t-1$.

La figure 3.5. montre que les corrélations des précipitations pour les mois pris individuellement pour les trois espèces sont significatives ($\alpha = 0,05$, $n = 33$) pour les mois suivant ; mars et mai pour TAK, décembre de l’année $t-1$ pour ISEQC et juin pour ISEQA. En outre, des corrélations positives appréciables mais non significatives sont aussi enregistrées, à l’image de celle du mois de septembre de l’année $t-1$ pour TAK, mars et avril de l’année t pour ISEQC, avril et janvier de l’année t pour ISEQA et, surtout, celles d’octobre de l’année $t-1$ pour les trois espèces, qui montre l’importance des précipitations automnales de l’année $t-1$ sur la croissance radiale de l’année t , un résultat rapporté aussi pour plusieurs forêts algériennes (Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014 ;

Ourdani, 2017 ; Slimani *et al.*, 2021b ; Ouigra, 2022).

Dans l'ensemble la précipitation est corrélée positivement avec la croissance radiale pendant les saisons douces (automne et hiver) et la température y est faiblement ou négativement corrélée lors de la période estivale.

La figure 3.5 et l'annexe 6 montrent que la corrélation entre la précipitation et la croissance radiale est plus importante en considérant des périodes de plus en plus longues, mettant ainsi en évidence l'effet cumulé des précipitations sur la croissance des arbres (4, 9 et 12 mois) ; un effet moins évident avec la température. Cet effet cumulé des précipitations est mieux exprimé par la figure des diagrammes de dispersion entre les précipitations et l'indice de croissance (annexe 6), qui affichent une relation de plus en plus linéaire, avec moins de valeurs aberrantes en considérant des périodes de plus en plus longues (1, 4, 9 et 12 mois).

Afin de définir les meilleurs périodes de l'année sur lesquelles une reconstitution climatique est possible, un test de la stabilité temporelle des corrélations partielles a été effectué entre l'indice de croissance et les précipitations sur la période totale (1981-2013) ainsi que sur la première (1981-1997) et la deuxième (1998-2013) sous-périodes d'analyse. Les résultats obtenus sur les meilleures fenêtres (1, 3, 4, 6, 9 et 12 mois) sont consignés dans le tableau 3.5.

Pour TAK, la corrélation entre la croissance radiale et la précipitation est plus stable en considérant les périodes mars-mai (trois mois), mars-juin (quatre mois) et mars-août (six mois) : les corrélations entre des deux sous-périodes sont proches et n'affichent aucune différence significative (valeur de p forte). Ceci montre à quel point les précipitations de la saison de croissance sont cruciales pour cette cédraie de Takoucht. Ainsi, pour ce site, des modèles de reconstitution de la précipitation printanière peuvent être testés sur les périodes de trois mois, de mars à mai, ou, comme déjà établi par Slimani *et al.* (2021b), sur quatre mois, de mars à juin. Une reconstitution sur la période de six mois, de mars à août est tout à fait possible. Mais il serait imprudent de reposer un modèle sur des mois de l'année durant lesquels il pleut peu et coïncidant avec la fin de la saison de la croissance.

La meilleure possibilité de la stabilité temporelle de la corrélation pour ISEQC s'étale sur la période d'octobre de l'année $t-1$ à juin de l'année t ($r = 0,63$ pour la période totale d'analyse ; $r = 0,66$ pour la première sous-période ; $r = 0,64$ pour la deuxième sous-période, $p = 0,929$). Les précipitations ont aussi été reconstituées sur la même période par Kherchouche *et al.* (2012, 2013) pour la région des Aurès et Slimani (2014) pour les régions des Aurès et de Kabylie. Ceci noté, un modèle de reconstitution pourrait bien être testé sur la période d'une année, de juillet de l'année $t-1$ à juin de l'année t . Néanmoins, ici aussi, Meko *et al.* (2011), qui ont aussi obtenu ces deux meilleures périodes de l'année pour la reconstitution climatique, rapportent qu'il serait plus prudent de d'établir un modèle sur la période de neuf mois, d'octobre à juin, au lieu d'une année complète,

incluant des mois avec des précipitations rares et orageuses. Il est aussi important de signaler les périodes de quatre mois, d'octobre de l'année $t-1$ à janvier de l'année t et celle de six mois, de décembre de l'année $t-1$ à mai de l'année t , qui, malgré une moindre stabilité temporelle, reflètent l'importance de la réserve des précipitations automnales et hivernales pour la zénaie du mont Issek.

Tableau 3. 5. Stabilité temporelle de la corrélation entre l'indice de croissance et les précipitations de la première à la deuxième sous-période d'analyse.

Site	Période (nombre de mois)	Corrélation ^a			Taille de l'échantillon ^b		Résultat du test ^c	
		Totale	Sous-période 1	Sous-période 2	N1	N2	ΔZ	p
TAK	Mai (1)	0,47	0,44	0,47	16	17	-0,0403	0,917
	Mars-Mai (3)	0,65	0,66	0,67	16	17	-0,0261	0,946
	Mars-Juin (4)	0,66	0,62	0,72	16	17	-0,1936	0,615
	Mars-Août (6)	0,59	0,62	0,59	16	17	0,0392	0,919
	Sept*-Mai (9)	0,48	0,76	0,32	16	17	0,6564	0,088
	Juillet*-Juin (12)	0,51	0,75	0,37	16	17	0,5828	0,130
ISEQC	Avril (1)	0,35	0,04	0,54	16	17	-0,5571	0,148
	Mars-Mai (3)	0,46	0,61	0,36	16	17	0,3324	0,388
	Oct*-Janvier (4)	0,50	0,43	0,57	16	17	-0,1869	0,628
	Déc*-Mai (6)	0,58	0,51	0,70	16	17	0,3076	0,4225
	Oct*Juin (9)	0,63	0,66	0,64	16	17	-0,0343	0,929
	Juillet*Juin (12)	0,64	0,63	0,71	16	17	-0,1429	0,711
ISEQA	Juin (1)	0,42	0,62	0,14	16	17	0,5791	0,133
	Sep*-Nov* (3)	0,39	0,40	0,47	16	17	-0,0780	0,839
	Oct*-Janvier (4)	0,42	0,11	0,75	16	17	-0,8575	0,26
	Août*-Janvier (6)	0,47	0,22	0,70	16	17	-0,7331	0,57
	Août*-Avril (9)	0,50	0,37	0,68	16	17	-0,4474	0,245
	Juillet*-Juin (12)	0,54	0,43	0,70	16	17	-0,4031	0,295

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

^a : Les corrélations linéaires de Pearson sont calculées pour la période totale (1981-2013), la première sous-période (1981-1997) et la deuxième sous-période (1998-2013).

^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. $p < 0,05$).

Ainsi, ISEQC, permettrait une reconstitution des précipitations sur des périodes plus longues que celles proposées avec la chronologie de TAK, qui est pourtant plus sensible à la variabilité climatique. Ceci serait principalement dû au fait que ce peuplement de chêne zéen (ISEQC) est relativement plus proche de la station météorologique de Béjaïa, dont est issue la donnée climatique utilisée dans l'analyse des corrélations saisonnières.

Enfin, comme attendu, c'est la chronologie établie pour le chêne afarès (ISEQA) - l'espèce la moins sensible à la variabilité climatique des trois étudiées - qui fournit le moins d'alternatives pour un modèle de reconstitution des précipitations. En effet, statistiquement, la période de trois mois, allant de septembre à novembre de l'année $t-1$ pourrait tout à fait générer un modèle de reconstitution dendroclimatique robuste. Ceci souligne l'importance de la précipitation automnale de l'année $t-1$ sur la croissance radiale du peuplement du chêne afarès du mont Issek. Néanmoins, par prudence, nous ne proposons pas non plus un modèle reposant sur cette fenêtre qui ne fait pas partie des périodes les plus pluvieuses de l'année et qui n'inclut pas des mois de la saison de la croissance.

Conclusion

Conclusion

La présente étude a exploré la réponse de trois de nos principales essences forestières montagnardes, le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*), le chêne zéen (*Quercus canariensis*) et le chêne afarès (*Quercus afares*), à la variabilité climatique au sein des Babors occidentaux (Béjaïa).

En utilisant une approche dendrochronologique, nous avons analysé le signal climatique enregistré dans les cernes de croissance de ces trois espèces afin de comprendre leurs réponses à la variabilité climatique ayant caractérisée la région d'étude.

Les espèces échantillonnées ont fourni des chronologies pluricentennaires. Ce qui a permis une analyse cerne-climat à court, moyen et long terme.

La croissance radiale des trois espèces sondées a montré une grande variabilité dans le temps, reflétant les fluctuations climatiques importantes survenues au sein de la région d'étude. Néanmoins, la plus grande variabilité est nettement affichée par la chronologie établie pour le cèdre de l'Atlas, illustrant la plus forte sensibilité des résineux à la variabilité climatique par rapport aux feuillus.

L'analyse des cernes diagnostiques et de l'évolution de la sensibilité moyenne des arbres a révélé plusieurs sécheresses récurrentes, avec des pics majeurs à la fin du XIX^e siècle et entre la fin du XX^e et le début du XXI^e siècles. Ces sécheresses sévères ont entraîné des épisodes de dépérissement forestier, mettant en lumière la vulnérabilité de nos forêts montagnardes à ces événements climatiques extrêmes.

En outre, une tendance marquée vers une augmentation de la variabilité climatique a été observée depuis la seconde moitié du XX^e siècle, se manifestant par une recrudescence des événements climatiques extrêmes comme des sécheresses sévères accompagnées d'incendies de forêt et des précipitations torrentielles causant des inondations graves. Cette imprévisibilité croissante de notre climat rend la gestion des écosystèmes forestiers et la prévention des catastrophes naturelles de plus en plus complexe.

L'analyse de la relation cerne-climat a permis de déterminer les périodes de l'année les plus propices pour reconstituer les précipitations passées pour la région d'étude. Les corrélations saisonnières obtenues avec la chronologie de la formation à chêne zéen permettrait une reconstitution des précipitations sur des périodes de l'année plus longues – allant jusqu'à 9, voire 12 mois – que celles affichées par la chronologie du cèdre de l'Atlas, qui est pourtant plus sensible à la variabilité climatique. Ceci serait principalement dû au fait que notre peuplement de chêne zéen est relativement plus proche de la station météorologique de Béjaïa, dont est issue la donnée climatique utilisée dans l'analyse cerne-climat. Par ailleurs, étant l'espèce la moins sensible à la variabilité climatique des trois essences étudiées, le chêne afarès fournit peu d'alternatives permettant d'établir

un modèle stable pour une reconstruction dendrochronologique des précipitations pour la région d'étude.

Ainsi, nos résultats révèlent des différences dans la réponse des espèces sondées à la variabilité climatique. Ceci fournit des informations précieuses à prendre en considération dans le cadre de la gestion durable de nos écosystèmes forestiers et de la préservation de leurs biodiversités, en prenant en compte les spécificités des différents sites, les caractéristiques des peuplements, ainsi que l'espèce forestière dominante, offrant ainsi une base solide pour une stratégie de gestion adaptée aux réalités écologiques locales.

La présente étude ouvre la voie à de nombreuses recherches futures, notamment en explorant les possibilités de reconstitution des précipitations avec les périodes de l'année proposée pour l'établissement des modèles de reconstruction. Ces travaux pourraient être particulièrement utiles pour améliorer la gestion de la ressource en eau dans la région d'étude dans le cadre du contexte des changements climatiques actuels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdessemed K., 1981. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma : étude phytosociologique, problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse Doc. Ing. Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix- Marseille, 201p.
- Abourouh M., 1983. Essai de mycorhization de *Cedrus atlantica* en pépinière. Thèse Doc. 3ème cycle. Université Claude Bernard, Lyon I, 127-138.
- Achhal A., Akabli O., Barbero M., Benabid A., M'hirit A., Peyre C., Quézel P., Rivas-martinez S., 1980. A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. Ecol. Médit. Fasc , 5, 211-249.
- Aissi A., 2019. Le chêne zéen à petites feuilles (*Quercus faginea Lam.*) dans l'Aurès : cartographie, écologie et taxinomie. Thèse de doctorat de l'Université Hadj Lakhdar- Batna, 93 p.
- Aissi A., Beghami Y., Heuertz M., 2019. Le chêne faginé (*Quercus faginea, Fagaceae*) en Algérie : potentiel germinatif et variabilité morphologique des glands et des semis. Plant Ecology and Evolution, 152(3), 437-449.
- Aissi A., Beghami Y., Lepais O., Véla E., 2020. Analyse morphologique et taxonomique du complexe *Quercus faginea (Fagaceae)* en Algérie. Botany, 99(2), 99-113.
- Akli A., 2022. Dynamique d'hybridation des chênes caducifoliés et sclérophylles de l'Akfadou (*Q. afares Pomel, Q. canariensis Willd, Q. suber L., Q. rotundifolia L.*). Thèse de Doctorat, Université de Tizi Ouzou, 224p.
- Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Cobb N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Management, 259(4), 660-684. (<https://scholar.google.com/scholar?q=A+global+overview+of+drought+and+heat-induced+tree+mortality+reveals+emerging+climate+change+risks+for+forests>)
- Arbez M., 1987. Les ressources génétiques forestières en France. Tome I : Les conifères. I.N.R.A. Université, Paris, 81p.
- Aussenac G., 1984. Le Cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysiological. Colloque de Bioclimatologie Méditerranéenne, Montpellier. Bull. Soc. Bot. Fr., 131, Actual. Bot, 2/3/4/, 385-398.
- Benckroun F., 1993. L'économie de la cédraie marocaine et son impact sur le développement des collectivités locales. Annales de Recherches Forestières du Maroc 27 (spécial), 714- 724.
- Bentouati, A., 2008. La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). Forêt Méditerranéenne, t. XXIX, (2), 203-208.
- Bneder A., 2009. La gestion forestière et le développement durable des cédraies du Maghreb. Revue des Eaux et Forêts, 11(2), 57-65.

- Bonan G. B., 2008. Forests and climate change : forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. (<https://scholar.google.com/scholar?q=Forests+and+climate+change%3A+forcings%2C+feedbacks%2C+and+the+climate+benefits+of+forests>)
- Boudy P., 1950. Économie forestière nord-africaine. Tome II : Monographies et traitement des essences forestières. Larose, Paris, 887p.
- Boudy P., 1952. Économie forestière nord-africaine. Tome II : Monographies et traitement des essences forestières. Larose, Paris, 887p.
- Boukerker H., 2016. Autoécologie et évaluation de la biodiversité dans les Cédraies de *Cedrus atlantica Manetti* dans le parc national de Belezma (Batna, Algérie). Thèse Doc. Université Mohamed Khider de Biskra, 213p.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G., 2004. La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française*, 56(2), 109-131. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03449335>)
- Cook E.R., 1985. A Time-Series Approach to Tree-Ring Standardization. PhD Thesis. The University of Arizona, Tucson, 171p.
- Cook E.R., Briffa K.R., 1990. A comparison of some tree-ring standardization methods, in : Cook E.R., Kairiukstis L.A. (Eds.). *Methods of Dendrochronology : Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 153-162.
- Cook E.R., Holmes R.L., 1999. Program ARSTAN User's Manual. Tucson, AZ : Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, 81p.
- Debazac, E.F., 1964. Manuel des conifères. Éditions de l'École Nationale des Eaux et Forêts, Imprimerie Louis-Jean, Nancy, 174 p.
- Del Villar E.H., 1949. Les *Quercus* de la section « *Gallifera* » de l'Afrique du Nord *In* travaux dédiés à R. Maire. *Mém H.S. Hist. Nat. Nord*, 2, Alger, 165-175.
- Delwaide A., Filion L., 2010. Échantillonnage et datation dendrochronologique, in : Payette S., Filion L. (Eds.). *La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, 167-197.
- Derridj A., 1985. Étude de l'écologie, de la régénération et de plantules du cèdre de l'Atlas *Cedrus atlantica Manetti*. D.E.A. UPS Toulouse France, 74.
- Derridj A., 1990. Étude des pollinisations de *Cedrus atlantica Manetti* en Algérie. Thèse Doc. Université Paul Sabatier, Toulouse, 288p.
- Ducrey M., 1981. Action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du Douglas (*Cedrus atlantica*, *Pseudotsuga menziesii*). *Ann. Scien. For*, 38(3), 317-329.

- Douglas G. W., 1946. An analysis of climate in relation to vegetation in the Mediterranean Basin. *The Journal of Ecology*, 34(2), 249-266.
- Emberger L., 1938. Contribution à la connaissance des cèdres en particulier du Deodar et du cèdre de l'Atlas. *Rev. de Bot. App. et d'Agr. tropicale. Bull.*, 17(198), 77- 91.
- Emberger L., 1939. Aperçu général sur la végétation au Maroc. *Travaux de botanique et d'écologie*. Masson, 380p.
- Émerit M., 1972. La question algérienne en 1871. *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, tome 19 N°2, 256-264. <https://doi.org/10.3406/rhmc.1972.2203>
- Fearnside P. M., 2005. Deforestation in Brazilian Amazonia : History, rates, and consequences. *Conservation Biology*, 19(3), 680-688. (<https://scholar.google.com/scholar?q=Deforestation+in+Brazilian+Amazonia:+History,+rates,+and+consequences>)
- Fidah A., 2016. Étude de la durabilité de naturelle des bois de *Cedrus atlantica* (Manetti) et de *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast. et évaluation de la bioactivité de leurs huiles essentielles sur les champignons basidiomycètes lignivores. Thèse Doc. Université des sciences rabat, 146p.
- Fritts H.C., 1976. *Tree rings and climate*. London, New York, San Francisco, Academic Press, 567p.
- Gausson H., 1967. Les gymnospermes actuelles et fossiles. *Compte rendu des Travaux du Laboratoire Forestier Toulouse*, 294-319.
- Güner S. T., Yaltrık F., Kandemir G., 2016. Distribution and Stand Structure of *Quercus ithaburensis subsp. Macrolepis* in the East Mediterranean Region of Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 37(1), 61-66.
- Hasnaoui B., 1992. Chênaies du nord de la Tunisie : Ecologie et régénération. Thèse Doc. Université de Provence Aix –Marseille I, 202p.
- Holmes R.L., 1983. A computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Kappelle M., Van Vuuren M. M. I., Baas P., 1999. Effets du changement climatique sur la biodiversité: revue et identification des principaux enjeux de recherche. *Biodiversity and Conservation*, 8(10), 1383-1397. <https://doi.org/10.1023/A:100893432422>
- Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez E., 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), 129-137. <https://doi.org/10.1684/sec.2013.0384>
- Kherchouche D., Slimani S., Ait Medjber R., 2021. La cédraie algérienne : état des lieux. Forêt Méditerranéenne, 24(2), 95-100.
- Krouchi F., 2010. Étude de la diversité de l'organisation reproductive et de la structure génétique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) en peuplement naturel (Tala- Guilef, Djurdjura Nord-Ouest, Algérie). Thèse Doc. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 227p.
- Laidi K., 2018. Modélisation de l'aire potentielle de *Quercus afares* en Algérie et en Tunisie. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 27p.
- Lapie G., 1909. Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurdjura. Thèse de Doctorat. Université de Paris. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.36980>
- Laribi M., 2000. Contribution à l'étude phytosociologique des formations caducifoliées à *Quercus canariensis Willd. et Q. afares Pomel* du massif d'Ath Ghobri-Akfadou (Grande Kabylie). Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 155p.
- Laribi M., Derrij A., Achrar M., 2008. Phytosociologie de la forêt caducifoliée à chêne zéen (*Quercus canariensis Willd.*) dans le massif d'Ath Ghobri-Akfadou (Grande Kabylie, Algérie). Fitosociologia , 45(2), 77-92.
- Laurance W. F., Useche D. C., Rendeiro J., Kalka M., Bradshaw C. J., Sloan S., Lovejoy T. E., 2014. A global decline in large old trees. Science, 338(6112), 1305-1306. (<https://scholar.google.com/scholar?q=A+global+decline+in+large+old+trees>)
- Lebourgeois F., Mérian P., 2012. L'étude des ressources forestières, UMR INRA-LERFOB 1092, 85p.
- Maire R., 1926. Carte phytogéographique de l'Algérie et de la Tunisie. Gouver . Génér. Alg., Serv. Cart, Alger, 78p.
- Maire R., 1952. Flore de l'Afrique du Nord. Encyclopédie biologique. Vol. I. Ed. Lechevalier, Paris, 366 p.
- Maire R., 1961. Flore de l'Afrique du nord. Vol. VII, Ed. Lechevalier, Paris, 329 p.
- Maire R., 1963. Flore de l'Afrique du Nord. Encyclopédie biologique, Vol. VII. Éditions Paul Lechevalier, Paris, 80-134.
- Mechergui K., Jaoudi W., Ammari Y., 2021. Le chêne zéen (*Quercus canariensis Willd.*) en Tunisie: Écologie, production, état de dégradation et les pratiques d'aménagement. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét, 10(1), 148-156.

- Mechergui K., Jaouadi W., Ammari Y., 2021. Le chêne zéen (*Quercus canariensis Willd.*) en Tunisie : écologie, production, état de dégradation et les pratiques d'aménagement, 148p.
- Meddour R., 1993. Analyse phytosociologique de la chênaie caducifoliée mixte de la Tala Kitane (Akfadou - Algérie). *Ecologia Mediterranea*, 19(314), 43-51. DOI:10.3406/ecmed.1993.1720
- Meddour R., 1994. La cédraie de l'Atlas blidéen (Algérie). Valeurs bioclimatique, syntaxonomique et dynamique. *Ann. Rech. For.*, 27, 105-127.
- Meddour R., 2010. Bioclimatologie, Phytogéographie et Phytosociologie en Algérie : Exemples des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjurenne. Thèse Doc. en Sciences Agronomique. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 461p.
- Meko D.M., Touchan R., Anchukaitis K.J., 2011. Seacorr : A MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Computers & Geosciences*, 37, 1234-1240. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.01.013>
- Messaoudène M., 1989. Dendroécologie et productivité de *Quercus afares Pomel* et *Quercus canariensis Willd.* dans les massifs forestiers de l'Akfadou et Béni Ghobri en Algérie. Thèse Doc. Université D'Aix Marseille III, 123p.
- Messaoudène M., 1996. Chêne zéen et Chêne afarès. La forêt Algérienne n°1, INRF, Alger, 18- 25.
- Messaoudène M., Tessier L., 1991. Croissance radiale de *Quercus canariensis Willd.* et *Quercus afares Pomel.* en Kabylie Algérie. *Ecologia Mediterranea*, 17, 119-133.
- Messaoudène M., Tafer M., Loukkas A., Marchal R., 2008. Propriétés physiques du bois de chêne zéen de la forêt des Aït-Ghobri (Algérie). *Bois et forêts des tropiques*, 298(4), 37- 48.
- Mhamdi S., 2014. Caractérisations morphologique, écologique et écophysiological d'une espèce endémique en voie d'extinction ; le Chêne afarès (*Quercus afares Pomel*) en Tunisie comparé aux chênes liège (*Quercus suber L.*) et zéen (*Quercus canariensis Willd.*).
- M'hirit O., 1980. Contribution à l'étude de la cédraie au Maroc : écologie, dynamique et gestion. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 292p.
- M'hirit O., 1982. Études écologiques et forestières des cédraies du Rif Marocaine : essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la production du cèdre de l'Atlas. *Ann. Rech. For. Maroc.* Vol, 2, 499p.
- M'hirit O., 1994. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) présentation générale et état des connaissances à travers le réseau *Silva mediterranea* "Le cèdre". *Ann. Rech. For. Maroc*, Tome, 27, 3-2.
- M'hirit O., 1999. Le Cèdre de l'atlas à travers le réseau *Silva méditerranée* « cèdre ». Bilan et perspectives. *Forêt méditerranéenne*, 3, 91-99.

- Mir C., Toumi L., Jarne P., Sarda V., Giusto F., Lumaret R., 2006. Endemic North African *Quercus afares* Pomel originates from hybridisation between two genetically very distant oak species (*Q. suber* L. and *Q. canariensis* Willd.): evidence from nuclear and cytoplasmic markers. *Heredity*, 96, 175-184.
- Nedjahi A., 1988. La cédraie de Chréa (Atlas blidéen) : phénologie, productivité, régénération. Thèse Doc. 3ème cycle. Université de Nancy, 184p.
- Nedjahi A., 1993. Étude de la croissance radiale des provenances du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en Algérie. *Silva Méditerranæa*. Actes du Séminaire International sur le cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc), 452-461.
- Obert D., 1974. Phases tectoniques mésozoïques d'âge anté-cénomaniens 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.
- Ouigra G., 2022. Dendroclimatologie du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) du mont Issek (Béjaïa, Algérie). Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. RUIZ
- Ourdani K., 2017. La réponse de la cédraie de Takoucht (Béjaïa) à la variabilité climatique. Mémoire de Master en Écologie Forestière, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 50p.
- OSS, 2008. Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb. Collection Synthèse 4, 84p.
- Quézel P., 1956. Contribution à l'étude des forêts de chênes à feuilles caduques. *Mem. Nat de l'Afrique du Nord*, nouvelle série, no 1, Alger, 57p.
- Quézel P., 1998. Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt Méditerranéenne*, 19(3), 243-260.
- 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., Médail F., 2003. Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Ed. Elsevier SAS, 571p.
- Quézel P., Santa S., 1962. Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales. Ed. C.N.R.S, Paris. Vol, 2, 1170p.
- 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. *Mém. Ing. Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen*, 67p.
- 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. *Magister en Foresterie, Université de Tizi Ouzou, Algérie*, 82p.

- Reichstein M., Bahn M., Ciais P., Frank D., Mahecha M.D., Seneviratne S.I., Zscheischler J., Beer C., Buchmann N., Frank D.C., et al., 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500, 287-295. <https://doi.org/10.1038/nature12350>
- Riou-Nivert P., 2001. Les résineux. Tome I : Connaissance et Reconnaissance. Ed. Inst. pour le Développement Forestier, 179p.
- Ruiz-Benito, P., Ratcliffe, S., Jump, A. S., Gómez-Aparicio, L., Madrigal-González, J., Wirth, C., ... & Zavala, M. A. (2017). Climate- and successional-related changes in functional composition of European forests are strongly driven by tree mortality. *Global Change Biology*, 23(10), 4162–4176.
- Seltzer P., 1946. Le climat d'Algérie. Université d'Alger, Institut de Météorologie et de Physique du Globe, 219p.
- Schulman E., 1954. Longevity under adversity in conifers. *Science*, 119(3091), 396-399. <https://doi.org/10.1126/science.119.3091.396>
- Slimani S., 2014. Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'historique des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie. Thèse Doc. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 171p.
- Slimani S., Kherchouche D., Ait Medjber R., 2021a . La cédraie algérienne à l'épreuve du changement climatique. *Forêt méditerranéenne*, 42(2), 101-106.
- Slimani S., Kherchouche D., Bekdouche F., Gutiérrez E., 2021b. 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>
- Stokes M.A., Smiley T.L., 1996. An Introduction to Tree-ring Dating. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 73p.
- 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 Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 143 p.
- Terrab A., Paun O., Talavera S., Tremetsberger K., Arista M., Stuessy T.F., 2006. Genetic diversity and population structure in natural populations of Moroccan Atlas cedar (*Cedrus atlantica*; *Pinacea*) determined with cpSSR markers. *American Journal of Botany*, 93(9), 1274-1280.
- Toth J., 1973. Premières approches de la production potentielle du Cèdre de l'Atlas dans le sud de la France. *Revu. For. Fra*, 25(5), 381-389.
- Toth J., 1978. Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) dans le sud de la France. Thèse Doc., Université Paul-Cézanne, Aix-Marseille III, France, 136 p.
- Toth J., 1990. Croissance, sylviculture et production de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) implanté dans une zone de chêne vert (*Quercus ilex*) de la région méditerranéenne française. Ed.

I.N.R.A. Vivaldi. Avignon. France, 40p.

Toth J., 2005. Le cèdre de France : étude approfondie de l'espèce. Ed. l'Harmattan, Paris, 105p.

Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Attalah S., Baisan C., Aloui A., 2008. Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical Research Letters*, 35 , L13705.

<https://doi.org/10.1029/2008GL034264>

Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Sabir M., Attalah S., Aloui A., 2010. Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim. Dyn.*

<https://doi.org/10.1007/S0038260106080464bent>

Watson J. E., Evans T., Venter O., Williams B., Tulloch A., Stewart C., Possingham H. P., 2018. The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2(4), 599- 610.

(<https://scholar.google.com/scholar.q=The+exceptional+value+of+intact+forest+ecosystems>)

Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D., 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 D.K., Brunstein F.C., 1991. Special sanding films and sandpapers for surfacing narrow-ring increment cores. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 43-46.

Yavuz H., Yavuz N., Ozel H. B., 2006. Growth and Nutrient Uptake of *Quercus cerris* Seedlings in Response to Liming and Fertilization on Calcareous Soils. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30(4), 257-265.

Zerizer A., et Mansseri A., 2003. Usinabilité et qualification des états de surface du chêne zéen algérien (*Quercus canariensis Willd.*): cas de la station de Beni Ghobri, wilaya de Tizi Ouzou. *Sciences et Technologie*, 19, 76-80.

Zine El Abdine A., 1987. Application de l'analyse multidimensionnelle à l'étude taxonomique et phytoécologique du chêne zéen (*Quercus faginea* Lamk. s. l.) et ses peuplements au Maroc. Thèse Doc. Ing. Université d'Aix-Marseille III, fac. De St Jérôme, 127p.

Zulueta J.,1980. Recherche en vue de l'amélioration des pâturages dans des forêts de *Quercus pyrenaica* et *Quercus faginea* en Espagne. *Dossier pâturage en forêt*, 58-72.

Annexes

Annexe 1. Températures moyennes mensuelles (°C) (station météorologique de Béjaïa).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1973	11,4	10,7	10,8	14,0	18,2	21,6	23,9	24,5	23,1	19,0	14,4	12,7
1974	12,4	12,0	13,1	13,5	17,8	20,8	22,8	23,7	23,6	17,4	15,5	11,4
1975	11,9	11,8	12,6	13,6	16,5	19,6	24,0	25,0	23,8	18,7	14,7	12,6
1976	11,0	11,8	12,4	14,2	17,4	20,5	23,6	23,7	22,6	18,5	13,3	13,9
1977	13,0	14,1	14,7	15,3	17,4	20,3	22,7	22,7	21,2	21,5	16,0	14,0
1978	10,6	14,1	13,3	14,1	16,9	20,5	23,6	24,1	21,8	17,7	13,8	15,0
1979	14,4	13,8	13,3	13,3	17,2	21,9	24,0	24,4	21,7	19,8	13,4	12,5
1980	11,7	12,5	13,3	13,3	17,0	20,5	22,4	25,0	23,3	18,5	16,3	10,1
1981	10,2	11,5	14,7	15,3	18,3	20,9	21,9	23,4	23,1	19,3	15,2	14,8
1982	12,8	11,7	13,1	14,6	18,1	22,9	27,1	24,9	23,0	19,2	15,8	11,3
1983	10,6	10,9	13,7	16,1	18,7	22,4	27,2	24,4	24,4	20,8	17,9	13,2
1984	12,2	11,1	12,5	19,2	16,6	20,6	25,5	24,0	22,9	18,6	17,5	12,4
1985	10,5	14,7	12,4	16,0	17,7	21,9	24,8	24,4	22,7	20,2	17,7	13,4
1986	11,7	12,4	13,1	15,0	19,2	21,3	23,9	26,3	23,6	20,7	15,6	12,0
1987	13,6	12,2	12,9	16,1	17,1	21,5	25,1	26,7	26,2	22,9	16,1	14,5
1988	14,1	11,7	13,2	15,4	18,4	21,5	25,2	26,4	22,2	21,9	16,3	11,2
1989	11,0	12,6	14,4	15,3	17,6	21,5	25,1	26,7	24,3	20,1	17,2	16,6
1990	12,0	14,2	14,6	14,6	18,4	22,2	24,3	24,5	25,6	21,7	16,2	10,8
1991	10,9	10,8	15,0	13,6	15,8	21,4	24,4	25,7	25,0	19,0	15,0	11,0
1992	10,6	11,5	12,8	14,7	17,5	20,0	23,3	24,9	24,0	19,6	16,5	13,2

1993	10,8	10,8	12,7	15,2	18,9	22,1	24,8	25,7	22,5	20,3	14,8	13,0
1994	12,0	12,8	14,2	14,2	19,7	22,0	25,4	28,6	24,9	21,0	17,2	13,2
1995	11,8	14,5	13,7	14,6	19,7	21,5	24,4	25,7	22,9	20,9	17,3	15,6
1996	14,5	11,9	14,3	16,0	17,9	21,4	24,3	25,3	21,7	18,4	16,6	14,9
1997	13,8	13,0	13,2	15,5	20,0	23,7	24,2	25,8	24,1	20,9	17,7	14,0
1998	13,0	13,4	13,8	16,2	18,2	22,8	24,2	25,2	24,1	18,6	15,1	11,8
1999	11,9	10,2	14,3	15,1	20,2	23,0	24,6	27,5	24,7	23,1	15,1	12,5
2000	10,2	12,6	14,1	16,9	19,4	21,8	25,8	26,7	23,7	19,7	17,0	14,7
2001	13,7	12,3	17,5	15,6	17,7	23,4	24,8	25,9	23,5	23,5	15,7	11,6
2002	11,8	12,4	14,4	15,7	18,4	21,7	24,3	24,8	23,2	20,5	16,9	14,7
2003	11,9	10,9	14,4	15,8	18,2	25,0	29,1	28,4	24,0	21,2	17,0	12,3
2004	12,3	13,6	13,9	15,2	17,3	21,4	25,1	26,9	24,3	22,9	15,0	13,0
2005	9,3	9,8	13,3	16,1	19,4	22,8	25,6	25,2	23,3	21,3	16,0	12,3
2006	11,0	11,8	14,8	18,0	20,8	22,8	25,4	25,4	23,7	22,5	18,7	13,7
2007	13,4	14,7	13,7	17,1	19,9	22,7	24,8	26,7	23,2	20,3	15,3	12,1
2008	12,5	14,0	14,0	16,5	19,0	22,0	26,0	26,0	23,5	21,0	15,5	12,5
2009	12,0	11,5	13,0	15,0	20,0	23,0	27,0	26,5	23,5	20,0	17,5	15,0
2010	12,5	14,0	14,5	17,0	18,0	21,5	25,0	25,5	23,5	20,5	16,0	14,0
2011	12,3	11,6	14,2	17,0	19,0	21,6	25,8	25,9	24,3	20,8	17,1	13,3
2012	11,7	8,5	13,8	16,6	18,8	24,4	26,1	27,5	23,5	21,3	17,7	13,5
2013	12,4	10,7	15,4	16,0	17,9	20,5	24,8	24,7	23,4	23,2	15,5	13,2
2014	13,9	13,9	13,1	16,9	18,1	22,4	24,1	25,8	25,9	22,1	18,8	13,4

2015	11,9	11,5	13,6	16,6	19,8	22,2	26,0	26,8	24,5	21,3	16,3	14,2
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

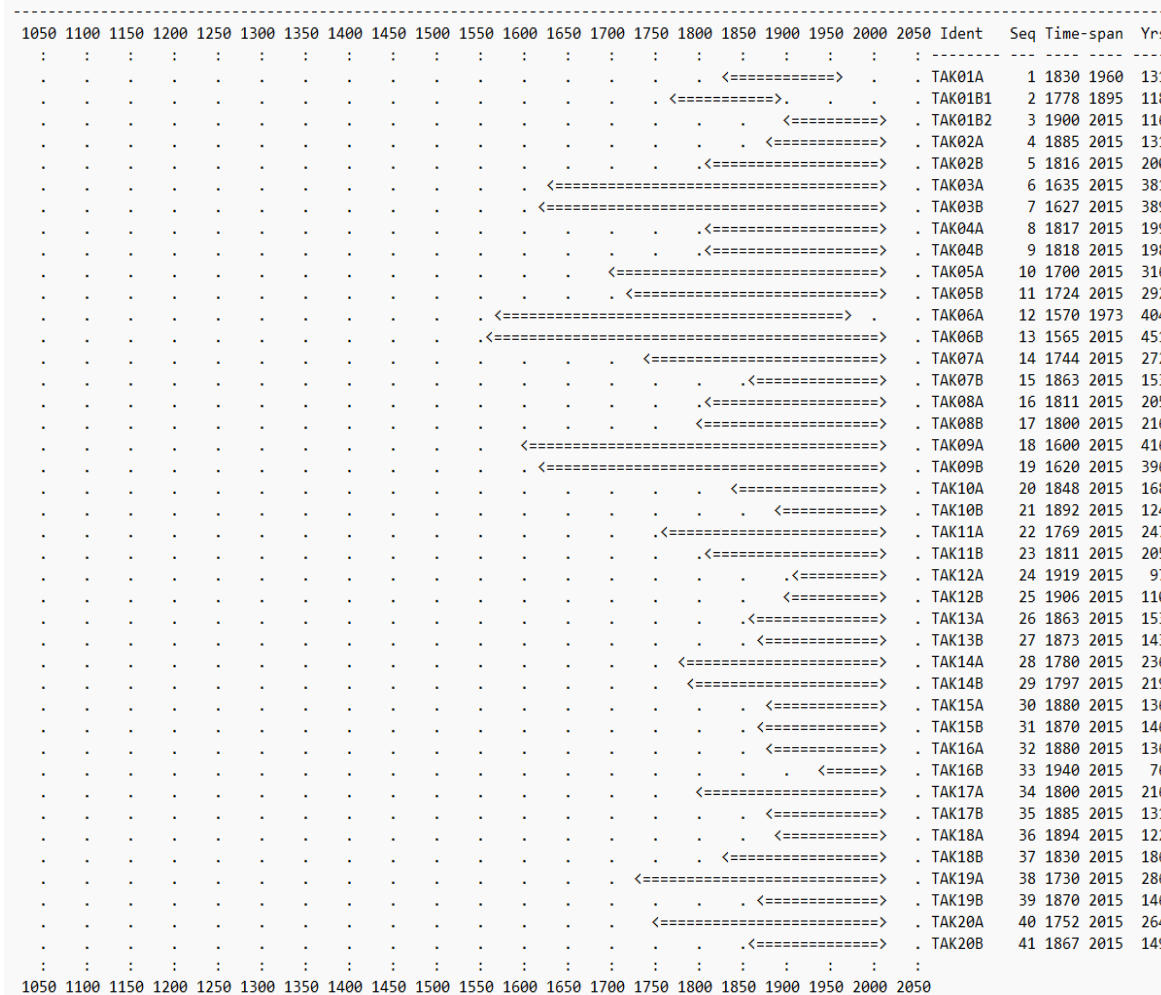
Annexe 2. Précipitations mensuelles (mm) (station météorologique de Béjaïa).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1970	30,9	56,0	130,7	215,7	67,6	1,2	12,4	0,0	1,0	186,7	2,8	131,7
1971	123,0	50,5	107,1	30,2	25,8	0,1	5,2	0,0	104,0	123,9	71,1	52,2
1972	155,9	67,4	93,3	86,8	89,7	25,1	4,4	16,5	106,0	76,4	20,5	230,0
1973	166,9	230,0	123,6	33,7	0,3	42,8	0,3	1,9	70,9	83,2	78,5	173,3
1974	21,8	163,5	161,1	105,0	2,2	7,1	8,3	1,7	75,1	227,0	43,6	40,3
1975	52,7	90,7	115,3	27,8	89,4	17,7	0,0	37,0	39,8	9,3	229,0	85,6
1976	131,8	140,8	66,1	72,1	47,1	30,5	47,3	19,2	47,3	99,7	138,0	72,4
1977	92,3	19,4	38,6	109,3	38,5	6,6	0,4	5,7	8,1	27,7	205,0	14,7
1978	124,5	78,9	144,1	111,9	50,8	1,9	0,1	0,0	15,2	90,5	106,0	10,1
1979	49,3	115,8	72,8	110,5	21,6	17,2	18,7	47,0	73,7	41,8	100,0	13,9
1980	48,3	26,5	118,3	94,3	35,1	1,7	1,3	4,0	3,3	42,9	159,0	386,2
1981	51,4	100,0	96,2	43,9	21,2	24,0	2,1	27,9	3,2	48,7	52,3	90,4
1982	299,1	100,2	57,7	49,4	74,4	0,8	0,4	39,1	23,6	107,7	112,0	226,4
1983	11,2	35,2	44,1	14,6	13,0	0,1	1,8	10,2	3,5	57,0	59,0	69,5
1984	221,4	189,7	90,0	25,5	60,0	8,9	0,6	3,6	17,4	262,5	6,0	215,0
1985	129,7	38,8	248,3	25,3	72,1	1,3	0,7	7,3	79,6	52,0	101,0	66,9
1986	125,5	81,0	183,4	35,6	12,5	22,1	4,5	4,7	37,3	184,1	136,0	222,2
1987	72,8	161,9	74,2	40,9	47,3	5,7	3,6	2,1	26,9	52,5	216,0	33,2
1988	39,9	94,7	69,2	56,3	44,9	50,2	0,0	1,8	61,1	0,9	242,0	206,8
1989	91,8	13,7	34,1	124,4	6,1	16,4	2,0	12,3	49,1	48,5	65,7	33,8

1990	123,2	1,0	43,7	58,4	85,8	16,9	8,7	2,5	3,4	41,4	72,2	295,5
1991	76,9	94,9	168,5	33,5	38,7	2,4	0,4	8,0	80,1	188,1	36,9	44,1
1992	160,6	53,3	115,1	125,0	47,6	37,0	3,4	0,0	3,1	31,8	52,5	260,4
1993	78,6	88,0	42,4	85,5	46,2	4,5	0,0	0,0	59,5	51,3	66,2	71,0
1994	55,3	81,7	0,8	55,6	8,4	2,1	0,2	0,6	133,0	73,6	18,2	149,4
1995	238,4	55,8	95,7	35,6	1,8	22,8	0,3	20,0	71,4	15,9	51,5	60,8
1996	105,7	220,4	58,9	118,3	43,9	38,8	9,6	4,1	37,6	47,0	95,1	54,0
1997	50,1	24,5	16,3	53,9	11,3	22,2	2,4	18,0	58,2	222,1	108,0	93,0
1998	16,1	79,6	60,7	95,4	160,3	3,3	0,0	10,4	45,9	81,4	185,0	129,3
1999	125,8	119,9	52,6	29,8	14,7	1,4	0,6	2,7	47,8	24,4	93,4	227,1
2000	72,9	21,7	13,9	27,3	53,7	5,3	1,4	0,0	13,0	76,5	30,9	65,5
2001	212,0	70,2	9,1	65,9	37,1	0,0	0,0	13,7	47,3	3,1	104,0	70,9
2002	68,8	103,6	57,5	18,1	23,5	0,0	116,1	28,1	61,7	36,1	193,0	315,0
2003	310,0	69,0	30,7	220,6	26,5	1,0	2,2	1,6	114,0	75,5	45,6	205,5
2004	147,9	54,6	86,9	110,4	69,9	26,0	0,0	5,0	18,8	30,4	178,0	128,4
2005	165,5	167,5	60,4	41,9	7,7	0,0	0,4	6,1	28,2	31,7	107,0	172,4
2006	126,7	141,0	46,5	17,3	53,3	4,8	1,0	34,6	35,3	21,3	13,3	132,7
2007	9,3	20,4	175,1	132,0	12,1	9,9	2,6	6,7	63,4	149,0	175,0	207,0
2008	7,0	20,0	120,0	37,0	66,0	7,0	3,0	4,0	144,0	61,0	131,0	73,0
2009	237,0	66,0	63,0	86,0	54,0	1,0	4,0	15,0	190,0	40,0	129,0	133,0
2010	53,0	55,0	107,0	44,0	57,0	38,0	1,0	6,0	39,0	135,0	162,0	70,0
2011	52,6	138,7	50,3	68,8	87,9	36,1	0,3	0,0	7,1	128,3	100,1	118,9
2012	89,9	323,4	74,9	198,4	7,4	95,5	1,0	2,0	333,8	83,6	106,4	57,2
2013	130,8	179,8	78,2	46,2	83,6	3,1	10,9	69,9	44,7	34,8	182,9	52,3
2014	84,6	56,6	138,2	17,3	10,2	66,8	0,8	1,3	6,1	76,2	9,2	262,9

2015	135,1	155,4	70,9	3,1	19,3	1,8	0,0	10,2	20,6	41,7	51,6	0,0
------	-------	-------	------	-----	------	-----	-----	------	------	------	------	-----

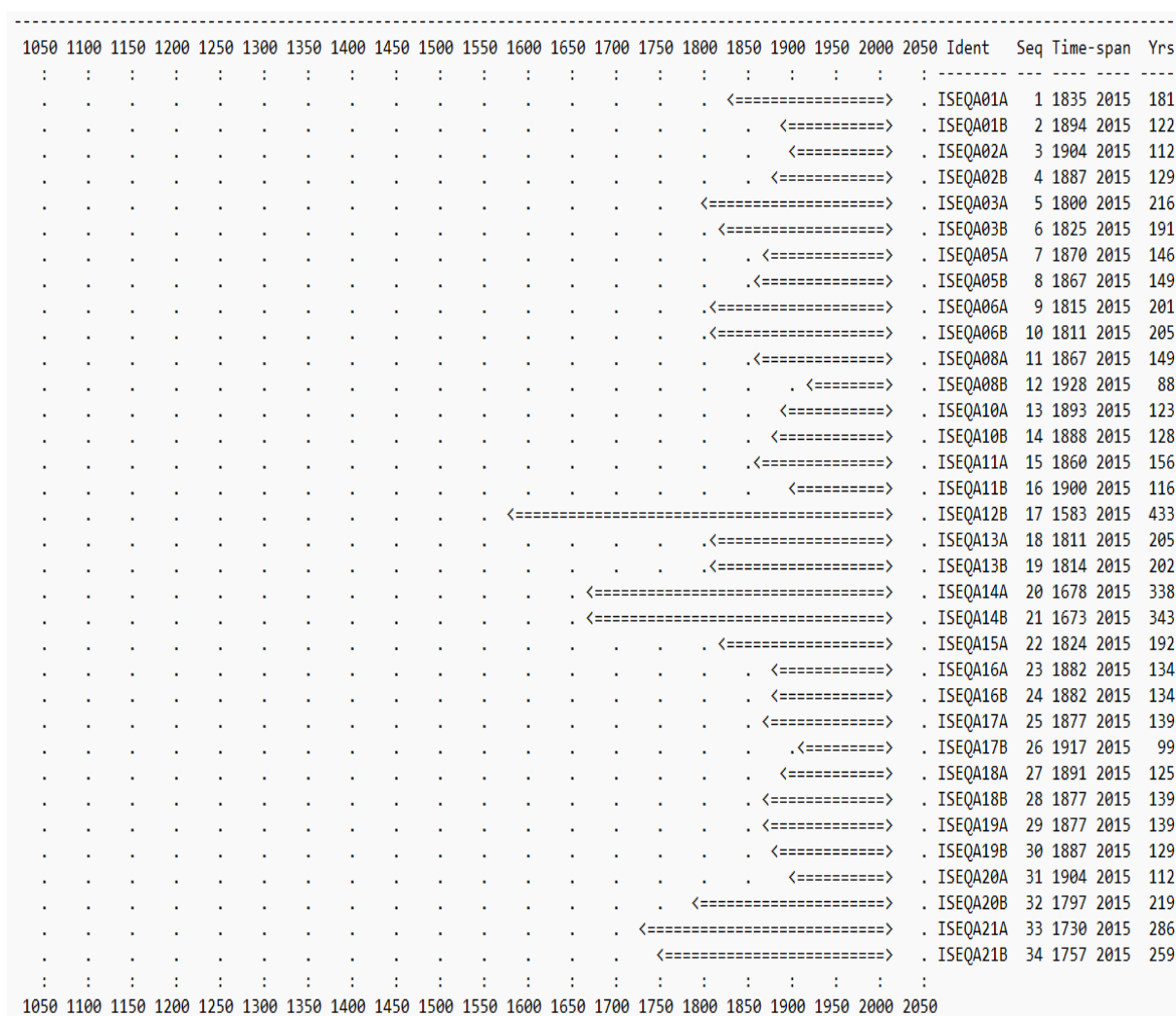
Annexe 3. Diagramme des longueurs des chronologies individuelles pour TAK.



Annexe 4. Diagramme des longueurs des chronologies individuelles pour ISEQC.

1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050	Ident	Seq	Time-span	Yrs		
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	ISEQC01A	1	1820	1970	151
.	ISEQC01B	2	1830	1964	135
.	ISEQC03A	3	1892	2015	124
.	ISEQC04A	4	1666	2015	350
.	ISEQC04B	5	1647	2015	369
.	ISEQC05A	6	1793	2015	223
.	ISEQC05B	7	1741	2015	275
.	ISEQC07A	8	1888	2015	128
.	ISEQC07B	9	1867	2015	149
.	ISEQC08A	10	1805	2015	211
.	ISEQC09A	11	1864	2015	152
.	ISEQC09B	12	1842	2015	174
.	ISEQC10A	13	1897	2015	119
.	ISEQC10B	14	1623	2015	393
.	ISEQC11A	15	1845	2015	171
.	ISEQC11B	16	1832	2015	184
.	ISEQC12A	17	1821	2015	195
.	ISEQC12B	18	1793	2015	223
.	ISEQC13A	19	1866	2015	150
.	ISEQC13B	20	1921	1990	70
.	ISEQC14A	21	1815	2015	201
.	ISEQC14B	22	1816	2015	200
.	ISEQC15A	23	1823	2015	193
.	ISEQC15B	24	1840	2015	176
.	ISEQC16A	25	1704	2015	312
.	ISEQC16B	26	1743	2015	273
.	ISEQC17A	27	1693	2015	323
.	ISEQC17B	28	1699	2015	317
.	ISEQC18A	29	1804	2015	212
.	ISEQC18B	30	1813	2015	203
.	ISEQC19A	31	1842	2015	174
.	ISEQC19B	32	1851	2015	165
.	ISEQC20A	33	1850	2015	166
.	ISEQC20B	34	1863	2015	153
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	
1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	2050						

Annexe 5. Diagramme des longueurs des chronologies individuelles pour ISEQA.



Annexe 6. Liste des années avec un cerne diagnostique mince. Les chronologies établies sont considérées au seuil EPS de 0.85.

TAK	ISEQC	ISEQA
1725		
1726		
1731		
1733		
1742		
1751		
1753		
1754		
1755		
1756		
1757		
1770		
1776	1776	
1777	1777	
-	1779	
-	1781	
1782	1782	
1783	1783	
1784	-	

-	1786	
-	1787	
-	1791	
-	1794	
1796	-	
1797	-	
1802	-	
-	1804	
-	1805	
1807	-	
1808	-	
-	1811	
1812	1812	
-	1820	
-	1821	
1822	1822	
1823	-	
1824	-	
1825	-	
1827	-	
1828	-	
-	1833	
1836	-	
1837	-	
-	1839	
1840	1840	
1841	-	
-	1844	
-	-	1849
-	1850	-
-	1851	-
1852	-	-
1853	-	-
-	1856	-
1858	1858	1858
1859	1859	1859
1860	-	-
-	-	1867
1869	-	-
-	1872	-
1875	-	-
-	1878	-
1879	1879	1979
-	-	1980
-	1881	1881
-	-	1882
1883	-	
-	1886	
-	-	1893
1894	-	1894
-	1895	-
-	-	1898
-	1902	-
1903	-	-
1904	-	-
-	-	1907
-	1912	-
-	1913	-
1914	-	-
-	1921	1921
1922	-	1922
-	1923	1923
1924	-	-
1925	1925	1925
-	1926	1926
1928	-	-
1935	-	-

-	1936	1936
-	1938	-
1939	-	-
1942	-	-
1944	-	-
1945	-	-
-	1946	1946
-	1947	1947
-	1950	1950
1957	-	1957
1958	1958	1958
1959	1959	-
1961	1961	-
1962	-	1962
1965	1965	1965
-	-	1966
-	1967	1967
-	-	1968
-	1974	-
-	1975	1975
-	1979	-
-	1980	1980
1983	-	1983
-	-	1984
-	-	1987
-	1990	-
1993	-	-
1994	1994	1994
-	1995	-
1996	-	-
1997	-	-
1999	-	-
2000	-	-
-	-	2001
2002	2002	2002
-	-	2007
2009	2009	2009
2012	-	-

Annexe 7. Liste des années avec un cerne diagnostique mince. Les chronologies établies sont considérées au seuil EPS de 0.85.

TAK	ISEQC	ISEQA
-		
-		
-		
1728		
-		
-		
-		
1735		
1736		
-		
-		
-		
1740		
1745		
1746		
1747		
1748		

1749		
1750		
-		
-		
-		
1760		
1761		
1762		
1764		
1765		
-	-	
1767	-	
1768	-	
-	-	
-	1771	
-	1772	
1773	-	
1775	-	
1781	-	
-	1784	
-	1785	
1788	-	
1789	1789	
1790	-	
1792	1792	
1793	1793	
-	1795	
-	-	
-	1799	
-	-	
-	1801	
1803	-	
-	1807	
-	-	
-	-	
1810	1810	
-	-	
1813	1813	
-	1814	
1815	-	
1816	-	
-	-	
1818	-	
-	1825	
-	1826	
-	1829	
1830	-	
-	1831	
1832	-	
1833	-	
-	-	
-	1835	
-	1837	
1838	-	
1843	-	
1844	-	
1845	-	
1846	-	
1847	1847	
-	-	1850
-	-	1852
-	1854	-
-	1860	-
1862	1862	-
1863	-	-
1864	1864	1864
-	1865	1865

1866	-	-
1868	-	-
-	1875	1875
-	-	1876
1881	-	-
-	1885	1885
1888	-	-
1889	1889	-
1890	-	-
-	1891	1891
-	1900	1900
1901	1901	1901
-	1906	-
-	1908	1908
1915	1915	1915
1917	1917	1917
-	1927	1927
-	1929	1929
1930	1930	1930
1932	1932	-
1933	-	1933
-	1940	1940
1941	1941	1941
1948	-	1948
-	-	1949
1952	-	-
-	1953	1953
-	1954	1954
-	1955	1955
-	-	1956
-	-	1960
-	1963	-
1968	-	-
1969	1969	1969
-	1973	1973
1976	-	1976
1977	-	1977
1978	-	1978
-	-	1979
1985	1985	-
1987	1987	-
1989	-	-
1992	1992	1992
-	-	1996
1998	-	-
-	1999	1999
-	-	2000
2003	2003	2003
-	2004	-
2008	-	-
2010	2010	-
2011	-	-
-	2013	-

Annexe 8. Diagrammes de dispersions entre les précipitations (P) et l'indice de croissance. Les meilleures corrélations sont illustrées pour les périodes d'un mois, de quatre, six et douze mois.

