

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

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



# Mémoire

*De fin d'études*

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Écologie Forestière,**  
**Spécialité : Diversité, dynamique et adaptation.**

Thème

**La réponse de la cédraie de Takoucht (Béjaïa)  
à la variabilité climatique.**

*Présenté par :*

M<sup>elle</sup> OURDANI Katia

*Devant le jury :*

Président	M <sup>me</sup> KROUCHI F., Maitre de conférences de classe (A) à l'U.M.M.T.O.
Promoteur :	M. SLIMANI S., Maitre de conférences de classe (B) à l'U.M.M.T.O.
Examineur :	M. AIT SAID S., Maitre de conférences de classe (A) à l'U.M.M.T.O.
Examineur :	M. AIT SIDHOUM D., Maitre-assistant classe (A), à l'U.M.M.T.O.

**Soutenu : 2017**

## **Remerciements**

*C'est pour moi un grand plaisir autant qu'un devoir, d'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidées pour mener à terme ce travail.*

*Je remercie particulièrement M. Saïd SLIMANI, de m'avoir encadré, guidé et soutenu tout au long de l'accomplissement de ce mémoire, ainsi que ses cours intéressants de l'anglais technique et la dendrochronologie. Qu'il trouve ici l'expression de mon plus profond respect.*

*Je tiens à remercier M. Ali MAHMOUDI (Conservateur des Forêts de Béjaïa), l'ensemble des Chefs de Circonscription de la Conservation pour leur soutien et leur persévérance pour la sauvegarde des cédraies dans la Conservation de Béjaïa.*

*Je remercie M<sup>me</sup> KROUCHI F. d'avoir accepté de présider mon jury, d'avoir fait preuve de beaucoup de patience avec moi durant mon cursus universitaire, et de m'avoir avant tout initié à aimer l'écologie forestière.*

*Je remercie aussi M. AIT SIDHOUM D. d'avoir examiné ce travail, et pour ses cours précieux et ses instructions de grande valeur et pour son aide*

*Un grand merci à M. AIT SAÏD., d'avoir accepté de faire partie du jury. Notamment pour les cours de méthodologie et physiologie d'adaptation des végétaux, qui me sont très utiles.*

## Dédicaces

Je dédie ce travail à la mémoire de ces hommes qui ont marqué mon existence, mon très cher oncle Djillali, cher grand père, et mon ami Messaoudène Mahand. Ma pieuse pensée va vers vous.

Mes très chers parents qui m'ont soutenu durant tout mon cursus, qui se sont sacrifiés pour moi et que je ne remercierai jamais assez,

A mes frères Ali et sa femme Tiha, Sissa et son mari Yacine, et Babil,

A mes grands-parents Ahmed et Yamina et Tassadit.

A Tous mes oncles et tantes,

A mes cousins Dyhia, Tina, Meziane, Tahar, Lina, Ryma, Dania, Massil, Alicia et à mes adorables nièces Ismahane, Nélia, Léticia, Sofia et Mélina,

A tous mes amis et amies, surtout Achour, Djef, Fahim, Idir, et Nadia.

Katouche

## **Réponse de la cédraie de Takoucht (Bejaia) à la variabilité climatique.**

### **Résumé**

Une chronologie reposant sur 20 arbres carottés à la tarière de Pressler a été établie afin d'analyser la réponse de la cédraie de Takoucht (Béjaïa) à la variabilité climatique à long terme. A notre connaissance, il s'agit du premier travail dendroclimatique au niveau de la Kabylie des Babors. Les tendances d'évolution de l'indice de croissance, de la sensibilité moyenne, de la fréquence relative en cernes diagnostiques et de la variance commune de la croissance entre les arbres sondés ont été utilisées pour caractériser la réponse de la cédraie d'étude à la variabilité climatique. Par ailleurs, le programme Seascorr a été utilisé afin de cerner la relation cerne-climat.

Les résultats montrent une forte sensibilité de la cédraie étudiée à la variabilité climatique. Ce phénomène a notamment marqué les dernières décennies, caractérisées par une augmentation de la fréquence en cernes diagnostiques, surtout en cernes très minces, formés lors des derniers épisodes récurrents de sécheresse, au cours desquels les arbres ont tendance à répondre de façon plus synchronique à la variabilité climatique. Ceci montre l'augmentation de l'effet des conditions climatiques à grandes échelles sur la croissance des arbres, avec une diminution concomitante de l'influence du microclimat et des conditions stationnelles, souvent vitales pour le maintien des peuplements du cèdre de l'Atlas.

Par ailleurs, les corrélations saisonnières impliquant l'indice de croissance et les données climatiques révèlent la possibilité d'une reconstitution dendrochronologique des précipitations pour la zone d'étude.

**Mots-clés :** dendrochronologie, variabilité climatique, cèdre de l'Atlas, mont Takoucht, Algérie.

## **The response of the Atlas cedar forest of Takoucht (Béjaïa) to the climate variability**

### **Abstract**

A chronology was developed from 20 trees, cored using an increment borer, in order to analyze the response of the Atlas cedar forest of Takoucht (Béjaïa) to the climate variability at long term. To the best of our knowledge, this is the first dendroclimatological investigation in the Kabylie of Babors. Evolution Trends in the growth index, in the mean sensitivity, in the relative frequencies in the pointer years and in the common response among the cored trees were used to characterize the response of the studied forest to climate variability. Besides, the program Seascorr was used to analyze the climate-growth relationships.

Our findings showed a high sensitivity of the Atlas cedar forest of Takoucht to climate variability. This phenomenon marked the last few decades, which were characterized by an increase in the frequency of the pointer years, especially in narrow rings, which were formed under the last episodes of recurrent droughts, during which the synchronicity in the response of trees to climate variability increased as well. This suggests an increase in the effects of the climatic conditions at larger scales on the tree growth with a concomitant decrease of the control of the microclimatic and the specific ecological conditions that maintain Atlas cedar stands in some areas.

Moreover, the seasonal correlations involving the growth index and the climate data revealed the possibility of the precipitation reconstruction for the sturdy area.

**Keyword:** dendrochronology, climate variability, Atlas cedar, mount Takoucht, Algeria.

# Table des matières

Introduction .....	
<b>Chapitre I : L'autoécologie du cèdre de l'Atlas.</b>	
1. Présentation du cèdre de l'Atlas .....	3
2. Systématique du cèdre de l'Atlas .....	3
3. Aire de répartition géographique .....	4
1. Aire naturee.....	4
2. Aire d'introduction .....	4
4. Caractères botaniques .....	5
a. Le port .....	5
b. La longévité .....	5
c. L'écorce .....	5
d. Le bois.....	
e. Le système racinaire.....	5
f. Les feuilles.....	5
g. les bourgeons .....	6
h. Organes reproducteurs et reproduction .....	6
5. Autoécologie du cèdre de l'Atlas .....	8
5.1. Précipitations .....	8
5.2. Températures .....	8
5.3. Altitude .....	8
5.4. Bioclimat .....	9
5.5. Substrat .....	9
5.6. Association végétale du cèdre de l'Atlas .....	10
6. Problème du cèdre de l'Atlas.....	11
1. Régénération .....	11
2. Dépérissement.....	11
1. Insectes .....	12
2. Champignons.....	12
<b>Chapitre 2 : Matériel et Méthodes</b>	
1. Milieu d'étude.....	13
1.1. Situation géographique et administrative de la cédraie de Takoucht .....	13
1.2. Géomorphologie.....	14
1.3. Géologie.....	14
1.4. Sol .....	14
1.5. Végétations .....	14

1.6. Synthèse climatiques .....	15
1.7. Etat de la cédraie .....	16
2. Méthode .....	16
2.1. Echantillonnage.....	16
2.1.1. Préparation des échantillons .....	17
2.1.2. Datation et mesure de cernes .....	18
2.2. Contrôle statistique de l'interdatation et développement de la chronologie maîtresse .....	20
2.3. Analyse de la croissance radiale .....	21
2.3.1. Analyse de la chronologie maîtresse brute .....	21
2.3.2. Evolution la sensibilité moyenne .....	21
2.3.3 Standardisation .....	21
2.3.4. Evolution de l'indice de croissance (chronologie résiduelle) .....	22
2.3.5. Fréquences relatives en cernes épais et en cernes minces .....	23
2.3.6. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les arbres .....	23
2.4. Relation cerne-climat .....	23
Chapitre 3 : Résultats et discussion	
3.1. Contrôle statistique de l'interdatation et développement des séries chronologiques .....	25
3.2. Analyse de la croissance radiale .....	28
3.2.1. Analyse de la chronologie maîtresse brute .....	28
3.2.2. Evolution la sensibilité moyenne .....	29
3.2.3. Standardisation.....	30
3.2.4. Evolution de l'indice de croissance (chronologie résiduelle) .....	31
3.2.5. Fréquences relatives en cernes épais et en cernes minces .....	32
3.2.6. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les arbres .....	34
3.3. Relation cerne-climat .....	36
Conclusion .....	40
Référence bibliographiques.....	42

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Principales caractéristiques de la chronologie maîtresse .....	26
<b>Tableau2 :</b> Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN dans la cédraie de Takoucht .....	30
<b>Tableau3:</b> Corrélations moyenne et variance du premier vecteur propre (VP) de la série résiduelle pour la cédraie de Takoucht.....	30
<b>Tableau 4 :</b> Stabilité temporelle de la corrélation entre les précipitations et l'indice de croissance.. .....	38

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Aire de répartition de <i>Cedrus atlantica</i> Manetti (Yahi et Djellouli, 2010). ....	4
<b>Figure 2</b> : Quelques caractères botaniques du cèdre de l'Atlas .....	6
<b>Figure 3</b> Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Toth, 2001 in Philippe <i>et al.</i> , 2006).....	7
<b>Figure 4</b> : Localisation de la cédraie de Takoucht (Plan 2D Google Maps modifié).....	13
<b>Figure 5</b> : Cédraie de Takoucht et aire d'échantillonnage (rectangle en ligne discontinue) .....	14
<b>Figure 6</b> : Vestiges de cèdre de l'Atlas montrant une forte activité du feu au niveau de la Cédraie de Takoucht. ....	16
<b>Figure 7</b> : Carottage d'un cèdre de l'Atlas .....	17
<b>Figure 8</b> : Préparation des échantillons pour la datation et mesure de largeurs des cernes annuels de croissance.....	18
<b>Figure 9</b> : Système d'imagerie numérique utilisé dans datation et la mesure de largeurs des cernes de croissance .....	19
<b>Figure 10</b> : Carotte de cèdre de l'Atlas de la forêt de Takoucht montrant une cicatrice de feu (échantillon TAK13B). Photo ImageJ. ....	25
<b>Figure 11</b> : Carotte de cèdre de l'Atlas de la forêt de Takoucht portant des canaux résinifères traumatiques à plusieurs endroits (échantillon TAK02B). Photo ImageJ.....	25
<b>Figure 12</b> : Diagramme des longueurs des chronologies individuelles généré par le programme COFECHA (modifié). ....	26
<b>Figure 13</b> Courbe de croissance de la cédraie de Takoucht exprimée en valeurs brutes des largeurs de cernes annuels.....	28
<b>Figure 14</b> : Evolution dans le temps de la sensibilité des cèdres sondés. Pour la courbe de la sensibilité moyenne, exprimée par des moyennes mobiles de 20 ans décalés d'une année, les valeurs sont présentées sur la dernière année de chaque période. ....	29

<b>Figure 15 :</b> Evolution de l'EPS et de la barre d'erreur du coefficient de corrélation de Pearson. Courbes générées par le programme Arstan (modifié). .....	31
<b>Figure 16 :</b> Chronologies maîtresse résiduelle pour la cédraie de Takoucht.....	32
<b>Figure 17 :</b> Fréquences relatives en cernes épais et minces sur la période relative à l'indice de croissance au seuil EPS de 0,85.....	33
<b>Figure 18 :</b> Graphique éboulis des valeurs propres (ligne continue) et test de bâtons brisés (ligne en pointillé) pour Takoucht. Les composantes sont significatives lorsque la courbe des valeurs propres passe au-dessus de la courbe générée par la procédure des bâtons brisés. ....	34
<b>Figure 19 :</b> Evolution spatiotemporelle de la variance expliquée par la CP1. Evolution dans le temps de la sensibilité des cèdres sondés. Pour la courbe de la sensibilité moyenne, exprimée par des moyennes mobiles de 20 ans décalés d'une année, les valeurs sont présentées sur la dernière année de chaque période. ....	35
<b>Figure 20 :</b> Fonction normale de densité de probabilité ajustée : histogramme de l'indice de croissance et test de normalité de Lilliefors (Conover, 1980 <i>in</i> Meko <i>et al.</i> , 2011).....	36
<b>Figure 21 :</b> Corrélations entre l'indice de croissance et les variables climatiques saisonnières. En haut les corrélations avec la variable climatique primaire, les précipitations (P). En bas les corrélations avec la variable climatique secondaire, la température (T). L'astérisque (*) indique les mois de l'année t-1. ....	36
<b>Figure 22 :</b> Diagrammes de dispersions entre les précipitations (P) et l'indice de croissance. Les meilleures corrélations sont illustrées pour les périodes d'un mois, de 3, de 9 et de 12 mois .....	38

# INTRODUCTION

## INTRODUCTION

La région méditerranéenne est l'un des *hot-spot* les plus importants dans le monde. Elle abrite une biodiversité riche et remarquable avec un taux d'endémisme élevé (Médail et Quézel, 1997). Les écosystèmes qui la caractérisent sont l'héritage d'une évolutive longue et complexe (Thompson, 2005 *in* Rhanem, 2013). Ils sont d'une grande vulnérabilité naturelle. Il s'avère qu'ils sont fragiles face à la rapidité de l'ampleur des changements environnementaux en cours. Cependant, les changements globaux et l'utilisation des terres sont deux facteurs qui déterminent leurs distribution dans le bassin méditerranéen (Linares *et al.*, 2011).

Les forêts de l'Afrique du Nord subissent des dégradations perpétuelles, dont les causes principales sont l'homme et le changement climatique. De plus, les dernières décennies sont marquées par une augmentation des températures, une diminution des précipitation et des épisodes de sécheresse récurrents (Hoerling et Kumar, 2003 ; Touchan *et al.*, 2008, 2010 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013, Slimani, 2014). Pour les années à venir, les modèles d'évolution du climat prévoient une hausse des températures, une plus grande fréquence des sécheresses et des tempêtes, une réduction des précipitations et un changement des rythmes saisonniers (IPCC, 2014 ; Davi, 2015). Ces effets ont un impact sur la croissance des arbres, leur phénologie ainsi que leur répartition (Candau, 2008). Le climat étant le facteur déterminant de la répartition des espèces, on comprend qu'un changement significatif et durable du climat mette en question la pérennité de toutes les espèces, partout où elles se trouvent (Legay, 2014).

L'évolution climatique dans les montagnes méditerranéennes pourrait augmenter le risque d'extinction grave d'espèces, voire de communautés végétales et engendrer le déclin significatif de la diversité biologique en raison de problèmes migratoires et de compétition interspécifique. Cette situation pourrait affecter plusieurs espèces endémiques dans chacune des principales chaînes montagneuses de la Méditerranée (M'Hirit et Et-Tobi, 2010). Plusieurs études révèlent que les cédraies spontanées sont significativement affectées par la variabilité climatique actuelle, avec une menace sérieuse sur les aires de distribution réelles, voire leur disparition dans certains habitats (Bentouati, 2008 ; Allen, 2010 ; Addar, 2012 ; Kherchouche, 2013 ; Slimani, 2014).

Le dépérissement du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) est un exemple édifiant, son habitat est morcelé et son aire de répartition est en régression. C'est une espèce très sensible à la sécheresse, qui peut être influencée par les variations climatiques actuelles et passées

## INTRODUCTION

(Touchan *et al.*, 2008). Les cédraies méridionales montrent un taux de dépérissement élevé (Addar, 2012). Afin de connaître le fonctionnement de cette essence aux contraintes climatiques, Linares *et al.*, (2010) et (Ilmen *et al.*, 2014) ont abordé cette thématique au Maroc. Sarmoum (2008) Alileche (2012) Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) Messaoudene, (2013) Slimani (2014) et Slimani *et al.* (2014) se sont penchés sur ce phénomène en Algérie. Les résultats rapportés mettent en évidence la régression de nos cédraies face au changement climatique en cours.

La présente étude a trait à l'analyse de la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique au niveau du mont Takoucht, situé dans la Kabylie des Babors (Béjaïa), qui fait partie de la limite septentrionale de cette essence forestière. A notre connaissance, il s'agit de la première étude dendroclimatologique au niveau des cédraies de la chaîne montagneuse des Babors. Les fréquences relatives en cerne diagnostiques, la tendance de la réponse des arbres avec une variabilité commune de la croissance, ainsi que l'évolution de la sensibilité moyenne dans le temps sont les principaux paramètres utilisés dans cette analyse. En outre, la relation cerne-climat a été approchée via une analyse des corrélations saisonnières impliquant un jeu de donnée climatique (températures et précipitations) et une chronologie maîtresse établie pour le site d'étude.

Cette étude a pour objectifs principaux (i) l'analyse du signal climatique commun entre les arbres sondés et (ii) de caractériser les corrélations liant les périodes sèches et humides à la croissance annuelle du cerne.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier est consacré à l'autoécologie du cèdre de l'Atlas. Dans le deuxième chapitre est présenté un aperçu du site d'étude ainsi que les méthodes d'étude adoptées. Le troisième chapitre dans lequel l'essentiel des résultats obtenus sont exposés et discutés. Ce dernier est scindé en trois suivantes parties : (i) Contrôle statistique de l'interdatation et développement des séries chronologiques ; (ii) Analyse de la croissance radiale ; (iii) Relation cerne climat.

# Chapitre I : Présentation du cèdre de l'Atlas

## I. Présentation du cèdre de l'Atlas

### 1. Présentation du Cèdre de l'Atlas

Les cèdres sont des conifères du genre *Cedrus* de la famille des Pinacées. Ils sont natifs de l'Ouest de l'Himalaya et de la région méditerranéenne : ils se localisent à une altitude de 1 500 à 3 200 m à l'Himalaya et de 1 000 à 2 200 m en Méditerranée (M'Hirit, 1999). Le cèdre est une essence de montagne, elle occupe des surfaces d'importance inégale et forme spontanément trois blocs géographiques distincts : Afrique du Nord, Asie mineure et Himalaya (M'Hirit, 1999). Le genre *Cedrus* s'est réfugié en Méditerranée orientale depuis plus de 23 millions d'années (Biltekin *et al.*, 2015). Le cèdre de l'Himalaya *Cedrus deodara* est une espèce ancestrale, qui avait divergé en deux lignées, *Cedrus libani* et *Cedrus brevifolia* (Bou Dagher-Kharrat *et al.*, 2007), avant la divergence de *Cedrus atlantica*, l'espèce nord-africaine, il y'a environ 8 millions d'années (Qiao *et al.*, 2007). Les données polliniques confirment la présence du genre *Cedrus* au Maroc depuis la période messinienne (environ 7-5 Ma) et tout au long du Pliocène et du Pléistocène (Feddi *et al.*, 2011; Magri, 2012). Les récentes conclusions de la phylogénie moléculaire font une nette distinction entre les deux espèces pourtant voisines, le cèdre de l'Atlas et le cèdre du Liban (Qiao *et al.*, 2007).

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est une essence montagnarde, endémique à l'état spontané des montagnes du Maghreb. Elle représente par excellence l'essence noble des forêts marocaines et algériennes (Quézel, 1998). En effet, cette cédraie est très intéressante pour ses nombreuses qualités forestières et ornementales, sa faible inflammabilité, sa rusticité, sa plasticité et sa richesse écologique (Fabre, 1976 ; Toth, 1980 ; Arbez *et al.*, 1978).

### 2. Systématique du cèdre de l'Atlas

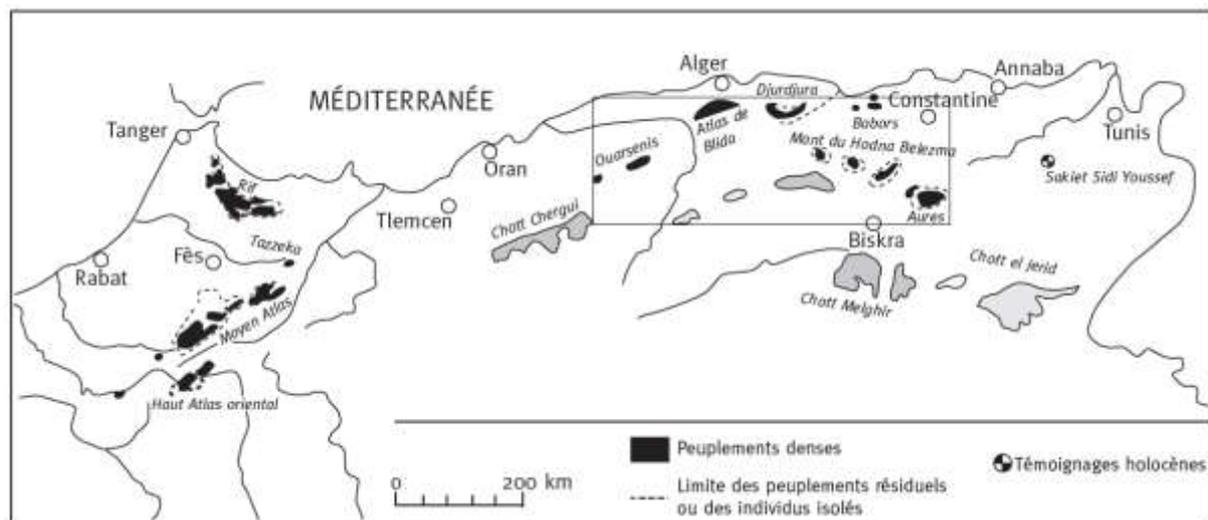
Au plan taxinomique, la systématique du cèdre de l'Atlas est la suivante (Toth, 2005) :

Règne :	Plantae
Embranchement :	Spermaphytes
Classe :	Gymnospermes
Ordre :	Coniferales
Sous-ordre :	Abietales
Famille :	Pinacées
Genre :	<i>Cedrus</i>
Espèce :	<i>Cedrus atlantica</i>

### 3. Aire de répartition

#### 3.1. Aire naturelle

Le cèdre de l'Atlas est localisé sur les montagnes du Maghreb (Fig.1). Le Maroc détient à lui seul la plus grande surface, couvrant environ 116 000 ha, répartie sur deux blocs d'inégale importance : le premier dans le moyen Atlas et le grand Atlas oriental avec une superficie de 100 000 ha, le second dans le Rif occidental et central, avec une superficie d'environ 16 000 ha, le moyen et le grand Atlas (M'Hirit, 1982 ; Yahi, 2007). En Algérie, la surface couverte par le cèdre est très restreinte et son aire est disjointe, beaucoup plus réduite qu'au Maroc. Elle est d'environ 30 000 ha, les cédraies algériennes s'organisent en îlots (Quézel, 1998).



**Figure 1.** Aire de répartition de *Cedrus atlantica* Manetti (Yahi et Djellouli, 2010).

Les cédraies humides sont localisées sur les montagnes littorales bien arrosées (Babors, Djurdjura, Atlas Blidéen, Ouarsenis), les cédraies sèches occupent les montagnes méridionales continentales de l'Atlas saharien, les cédraies de Aurès et de Belezma, qui couvrent environ 17 000 ha, réparties entre les massifs de l'est, du Chélia, S'gag, Aidel, Ouled yacoub et du Belezma, à de l'ouest, avec les massifs de Maadid, Boutaleb et Guetiane (Hodna) (Nedjahi, 1988 ; Yahi, 2007).

#### 3.2. 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 de son introduction : 1862 sur le mont Ventoux (France), 1864 en Italie, 1890 en Bulgarie (M'Hirit, 1982). Il est introduit à titre expérimental en Yougoslavie, en Espagne, au Portugal, en

I. présentation du cèdre de l'Atlas Angleterre et en Belgique (Nedjahi, 1988). Le cèdre a été introduit même en dehors des pays du pourtour méditerranéen. Il a été en effet introduit 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 ; M'Hirit, 1994).

### **3. Caractères botaniques**

Les caractères botaniques principaux du cèdre de l'Atlas sont présentés sur figure 2.

#### **a. Le port**

Le cèdre est un arbre remarquable et majestueux. Il a un fût rectiligne. Sa silhouette élancée peut dépasser 40 m de hauteur. Le port d'un jeune Cèdre est pyramidal, en vieillissant sa forme devient tabulaire (Toth, 1970). La circonférence d'un cèdre peut mesurer 2 à 3 m, mais peut éventuellement atteindre des mesures importantes jusqu'à 8 m voire plus (Krouchi, 2010).

#### **b. La longévité**

Très longévifs, des arbres mesurés dans le Moyen Atlas (Col du Zad), à 2 000 m d'altitude, datent de plus de 1 200 ans (M'Hirit et Benzeyane, 2006).

#### **c. L'écorce**

L'écorce d'un jeune arbre est lisse et brune, avec l'âge, de petites écailles grises foncées ou crevassées se forment (Dupérat *et al.*, 2008 ; Neffati *et al.*, 2017).

#### **e. Le bois**

Le cèdre de l'Atlas fournit un bois de qualité supérieure et de forte durabilité (Messaoudene, 2013).

#### **f. Le système racinaire**

Le système racinaire est très développé, pivotant, ce qui permet la bonne fixation et l'ancrage de l'arbre au sol (Toth, 1970).

#### **g. Les feuilles**

Les feuilles sont en forme d'aiguilles aiguës, isolées sur les pousses de l'année, portées sur de très courts rameaux (mésoblastes) et groupées en rosettes sur les rameaux longs

I. présentation du cèdre de l'Atlas (auxiblastes), persistantes, de couleur gris bleu. Leur durée de vie est de 3 ans. Leur longueur est comprise entre 1 et 2 cm (M'Hrit et Benziane, 2006).

#### h. les bourgeons

Les bourgeons sont petits et gris jaunâtres et occupent le centre des rosettes.



**Figure 2.** Quelques caractères botaniques du cèdre de l'Atlas : a) cèdre avec un port de forme plus ou moins pyramidale (forme régulière), b) cèdre avec un port de forme tabulaire, c) surface caractéristique du tronc, d) bourgeons portant des aiguilles et chatons (♂) et e) rosettes d'aiguilles et cônes (♀) matures.

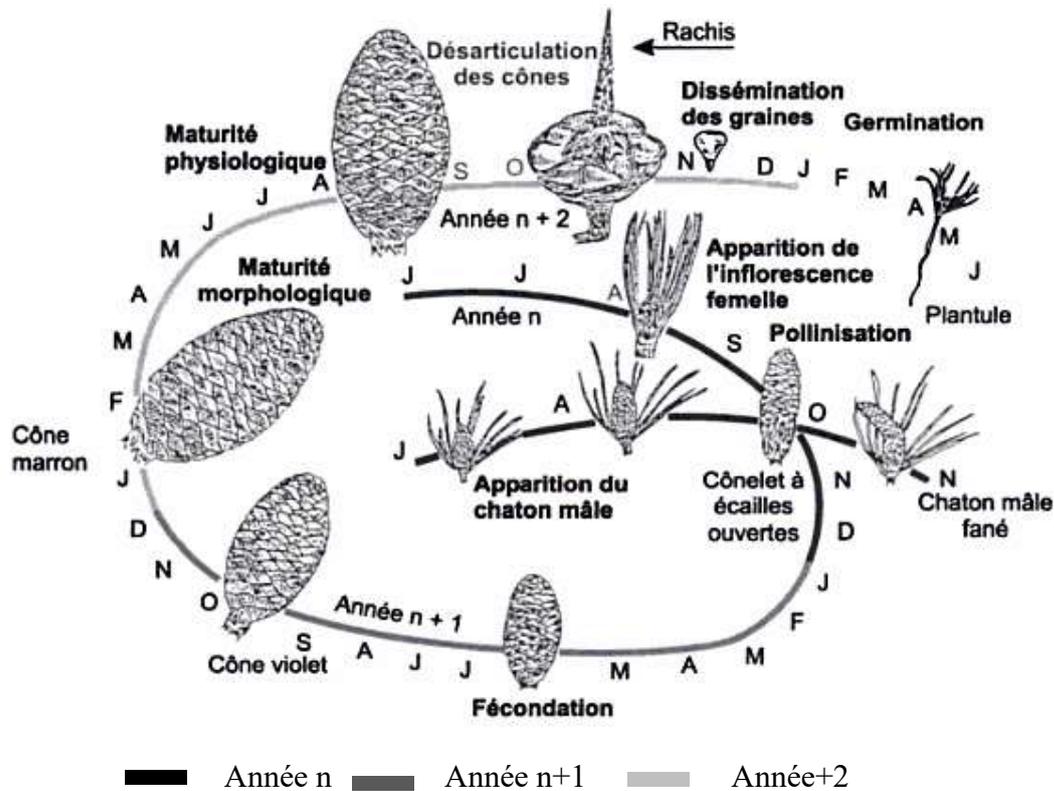
#### g. Organes reproducteurs et reproduction

Le cèdre de l'Atlas est une espèce monoïque, mais une dioïcie fonctionnelle a été observée chez certains arbres qui tendent à être plutôt femelles et d'autres plutôt mâles (Krouchi, 2010).

Les organes mâles sont des chatons de forme cylindro-conique et les organes femelles sont des inflorescences qui se développent en cônelets puis en cônes (Krouchi, 2010).

## I. présentation du cèdre de l'Atlas

Les inflorescences sont portées par des rameaux courts (Arbez *et al.*, 1978). La floraison est automnale et la pollinisation est anémophile, se produit au mois de septembre (Phillipe *et al.*, 2006).



**Figure 3.** Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Toth, 2001 in Philippe *et al.*, 2006).

Le cycle de reproduction du cèdre présenté sur la figure 3. Il est caractérisé par une floraison automnale.

Les strobiles mâles apparaissent en fin juin de l'année n, avec deux mois d'avance sur les inflorescences femelles. L'apparition différée des fleurs femelles suggère que les bourgeons reproducteurs des deux sexes s'initient à des périodes différentes. La pollinisation, anémophile, se produit au mois de septembre d l'année n mais les grains de pollen ne germent qu'au printemps suivant, fin mai- début juin. La fécondation a lieu en juin n+1 et les graines sont formées à l'automne. Elles ne sont toutefois libérées qu'un an plus tard, à l'automne n+2 ou durant l'hiver suivant (Phillipe *et al.*, 2006).

La graine est de forme triangulaire, de 10-15 mm, marron roux se terminant par une large aile, enveloppée d'une pellicule résineuse qui sert de protection (Dupérat *et al.*, 2008).

## I. présentation du cèdre de l'Atlas

La désarticulation des cônes, sous l'effet d'une « imbibition » suivie d'un gel tissulaire, puis d'un dégel, leur permet la libération des graines vers la fin de la troisième année. Après une période de dormance variable en fonction des conditions climatiques, la germination des graines démarre à des températures proches de + 4 °C (Derridj, 1990 ; M'hirit, 1999 ; Toth, 2005 ; Philipe, 2006 ; Aidrous Larbi, 2007 ; Krouchi, 2010).

### 4. Autoécologie du cèdre de l'Atlas

#### 4.1. Précipitations

Dans son aire naturelle, le cèdre de l'Atlas, reçoit des lames de pluies annuelles comprises entre 450 et 1 500 mm Putod (1979 *in* Slimani, 2014). Cependant, la répartition des pluies est irrégulière (Quézel, 1976).

Les cédraies des Aurès et du Hodna reçoivent des précipitations annuelles qui varient de 720 à 770 mm. Les cédraies de Djurdjura méridional, l'Ouarsenis, Chréa et Meurdja reçoivent une lame de 1 126 à 1 420 mm/an. Les cédraies des Babors et du Djurdjura septentrional reçoivent quant à elles une lame de pluie qui varie entre 1 600 et 2100 mm/an (Derridj, 1990).

#### 4.2. Températures

L'écologie du cèdre de l'Atlas correspond à des climats doux, mais il supporte les froids hivernaux (Aussenac, 1984). Le cèdre croît à une température moyenne annuelle comprise entre 9,8 et 12 °C (Boudy, 1955). Il tolère en peuplements naturels des températures minimales comprises entre -1 et -8 °C (Quézel, 1980 ; Benabid, 1994).

La germination et la croissance du cèdre de l'Atlas s'effectuent sous des températures moyennes annuelles comprises entre 8 et 14 °C (Toth, 1980).

#### 4.3. Altitude

Le cèdre occupe partout les sommets des montagnes. Il s'installe sur les versants nord, d'une façon générale, à partir de 1 400 m, bien qu'il peut descendre encore plus bas à la faveur des conditions microclimatiques particulières (Emberger, 1938 ; Abdessemed, 1982). En effet, ces limites changent d'un endroit à un autre. Derridj (1990), rapporte des limites sur les versants sud avec un décalage de 200 m en moyenne, comme dans le Chélia, et pouvant même atteindre 400 à 500 m comme au Belezma.

Abdessemed (1982) signale que les limites inférieures du cèdre de l'Atlas se situent sur les versants méridionaux vers 1 600 m d'altitude. La limite supérieure est de 2 200 m pour les deux versants bien que des individus isolés arrivent jusqu'à 2 300 m. Meddour (1994) note

## I. présentation du cèdre de l'Atlas

que 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. Au Maroc, la limite inférieure du cèdre de l'Atlas est de 1 500 à 1 600 m et sa limite supérieure va jusqu'à 2 600 et 2 800 m (Boudy, 1952). Il peut pénétrer exceptionnellement dans les bas-fonds lorsque les conditions de station sont favorables. Il est aussi présent sur le versant sud, mais d'une façon éparse et moins venante au niveau des crêtes et à des altitudes qui s'élèvent à plus de 1 800 m (Bentouati et Oudjih, 2008).

### 4.4. Bioclimat

Le cèdre de l'Atlas s'accommode aux climats très différents (Krouchi, 2010), car il se trouve dans différentes situations bioclimatiques au centre et l'est du pays. Meddour (1994) souligne que les cédraies septentrionales algériennes (l'Atlas blidéen, le Djurdjura et le massif des Babors) sont soumises à un bioclimat humide, à variante fraîche voire perhumide. Tandis que la majorité des cédraies méridionales (Aurès, Belezma, Hodna) sont soumises aux bioclimats subhumides froid et très froid (Abdessemed, 1982 ; M'Hrit, 1982). Notons que Abdessemed (1982) a signalé la présence de cette espèce dans les Aurès sous le bioclimat semi-aride supérieur.

Selon Quézel (1998), les cédraies supérieures, essentiellement oroméditerranéennes, doivent quant à elles se rattacher plutôt à la variante extrêmement froide du bioclimat méditerranéen subhumide.

### 4.5. Substrat

L'originalité édaphique du cèdre de l'Atlas réside, tout particulièrement dans sa rusticité et son indifférence à la nature lithologique du sol, excepté vis-à-vis des substrats très compacts ou superficiels où sa croissance est faible. Il craint l'hydromorphie, les sols mal drainés, asphyxiants et mouilleux (Toth, 1970 ; Rhanem, 2010).

Le cèdre de l'Atlas s'installe sur divers types de substrats (Boudy, 1950 ; Quézel, 1976; Benabid, 1982). Il se rencontre sur des basaltes, de la dolérite, des marno-calcaires, des marno-schistes, des dolomies, des calcaires dolomitiques, des schistes et des grès au Maroc ; sur des grès blancs, des dolomies, des calcaires francs, des calcaires dolomitiques et des marnes en Algérie (M'Hrit, 1999).

Les types de sols rencontrés dans les cédraies sont du type fersiallitiques sur calcaires, rendzine magnésienne sur dolomie, andosolique sur basalte, ocre podzolique sur grès avec une richesse en matière organique et en fer (Lepoutre, 1961).

Cependant les substrats siliceux paraissent offrir un bilan hydrique beaucoup plus favorable que celui observé sur les substrats calcaires et calcaires dolomitiques (M'Hrit, 1999).

#### 4.6. Association végétale du cèdre de l'Atlas

L'aire de répartition du Cèdre de l'Atlas se situe principalement entre l'étage supraméditerranéen et l'étage oroméditerranéen et ses associations floristiques varient d'un étage bioclimatique à un autre (Boudy, 1952). L'étude des groupements forestiers du Cèdre de l'Atlas montre qu'ils s'inscrivent au plan syntaxonomique dans :

Ordre des *Quercu-Cedretalia atlanticae* de la classe *Quercetea pubescentis* dont les espèces caractéristiques sont : *Quercus faginea*, *Q. canariensis*, *Q. pyrenaica*, *Q. afares* et les sapins endémiques du Maghreb (*Abies maroccana*, *A. numidica*) ;

Ordre des *Quercetalia ilicis*, dont les espèces caractéristiques sont *Cytisus triflorus*, *Ruscus aculeatus* *Festuca triflora*, *Teucrium pseudo-scorodonia*, *Quercus ilex* et *Viburnum tinus* (Meddour, 2010).

En Algérie, Yahy (2007) a décrit l'association du cèdre avec deux (02) faciès :

a. Le faciès sublittoral de l'Atlas tellien où deux types de cédraies sont distingués :

Formations mixtes composées principalement de *Cedrus atlantica* et *Quercus canariensis*, avec la présence de *Acer obtusatum* au djurdjura oriental, *Acer obtusatum*, *Abies numidica* et *Populus tremula* dans les Babors et *Quercus ilex* dans le massif semi-continentale de l'Ouarsenis (Téniet El Had).

Formations pures à *Cedrus atlantica*, *Ilex aquifolium* et *Taxus baccata*, en présence de *Juniperus communis* subsp *hemisphaerica* dans le Djurdjura oriental et occidental et dans l'Atlas Blidéen ( Yahy, 2007).

b. Le faciès continental des Aurès, du Belezma et du Hodna qui rassemble les peuplements les plus méridionaux représentés par une formation pure à *Cedrus atlantica*, *Taxus baccata* et *Ilex aquifolium* en présence de *Juniperus communis* subsp *hemisphaerica*, en mélange localement avec *Juniperus thurifera* subsp. *africana*, *Juniperus turbinata* et *Fraxinus dimorpha*.

## **5. Problème du cèdre de l'Atlas**

### **5.1. Régénération**

La régénération du cèdre de l'Atlas exige un sol meuble et suffisamment profond pour être capable de retenir l'eau en saison sèche. L'absence d'un tapis herbacé qui peut entrer en concurrence vitale avec les jeunes semis assure une meilleure régénération (Boudy, 1952).

Avec des précipitations normales ou supérieures à la normale, la date d'apparition des premières germinations est commandée par l'évolution de la température maximale. L'installation de la plantule ne peut se faire que si la température maximale journalière atteint la valeur de +10 °C pendant une durée de 8 à 10 jours (Lepoutre, 1964). Toutefois, les jeunes semis peuvent être fortement affectés par les froids tardifs et/ou la précocité de la sécheresse estivale (Lepoutre, 1964). Par ailleurs, Boudy (1952) signale qu'au Maroc et en Algérie chaque année le sol forestier se recouvre d'un grand nombre de semis dont la plupart disparaissent en été.

Vers le début de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, Lepoutre et Pujos (1964) note que la régénération naturelle du cèdre ne s'effectuait à l'époque qu'au niveau des cédraies de basse altitude, là où les jeunes plantules peuvent résister au stress hydrique sous le couvert de *Quercus ilex*. Paradoxalement, de nos jours, pendant que les conditions climatiques sont caractérisées par des périodes de sécheresse récurrentes et juste après un rarissime épisode de dépérissement ayant touché de plein fouet nos cédraies entre la fin des années 1990 et le début des années 2000 (Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Touchan *et al.*, 2010 ; Slimani, 2014), une bonne régénération à différentes altitudes a été rapportée, notamment pour les cédraies des Aurès et de Kabylie, par Slimani (2014). C'est aussi le cas pour notre cédraie d'étude, qui présente par endroits une assez bonne régénération.

Néanmoins, les semis se développent sous la menace permanente du surpâturage et des incendies très fréquents dans ce mont.

### **5.2. Dépérissement**

Depuis le début des années 1980, le cèdre de l'Atlas connaît un dépérissement préoccupant, diffus ou concentré (Rhanem, 2011 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014). Le dépérissement atteint des proportions anormalement élevées dans un certain nombre de massifs forestiers et affecte la majorité des cédraies nord-africaines avec des

degrés variables (El Abidine, 2003 ; Bentouati, 2008 ; Linares *et al.*, 2011 ; Rhanem, 2011 ; Kherchouche *et al.*, 2013 ).

### 5.2.1. Insectes

Parmi les insectes ravageurs, on peut distinguer les trois classes suivantes :

- ✓ Insectes phyllophages : se nourrissent des aiguilles et de la sève du cèdre ;
- ✓ Insectes xylophages : se nourrissent du bois du cèdre ;
- ✓ Insectes qui apprécient les cônes et les graines de l'arbre (Mouna *et al.*, 2016).

Parmi les parasites les plus courants du cèdre de l'Atlas dans son aire d'origine, nous citons des coléoptères foreurs (Cerambycidae, Scolytinae, Buprestidae, dont *Phaenops marmottani* Fairmaire, qui cause des dégâts importants au Maroc, des Tortricidae (Lepidoptera), des Anobiidae (Coleoptera), des Torymidae (Hymenoptera) sur les cônes, des pucerons (*Cinara spp.* et *Illinoia morrisoni* Swain, Hemiptera) et des Notodontidae (Lepidoptera) du genre *Thaumetopoea*, dont la processionnaire du cèdre, *Thaumetopoea bonjeani* Powell (Abdelhamid *et al.*, 2017).

### 5.2.2. Champignons

Les champignons sont impliqués dans diverses affections du Cèdre de l'Atlas. Ils s'attaquent à tous les organes sur lesquels ils provoquent de nombreux symptômes et dégâts. Ils décomposent le bois et entraînent des pourritures (Abourouh et Morelet, 1999 ; M'Hirit et Benzyane, 2006).

Les principales pourritures débutent soit par les racines (*Armillaria mellea*, *Fomes annosus*, *Polyporus schweinitzii*), soit par une blessure des parties aériennes (*Xanthochrous pini*, *Polyporus sulfureus*, *Phellinus dryadeus*, *Fistulina hepatica*, *Ungulina fomentaria*, *Ungulina betulina*, *Stereum frustulatum*, *Ganoderma applanatu* (Zaremski *et al.*, 2007).

Deux champignons qui causent la pourriture fibreuse nommée M'jej (Lanier, 1994). Il s'agit de :

- ✓ *Phellinus chrysoloma*, connu sous le nom de pourriture rouge ou pourriture annulaire du cèdre ;
- ✓ *Phellinus pini*, caractérisé par la pourriture blanche active qu'il développe chez de nombreux résineux, notamment le cèdre.

Ce sont des Basidiomycètes qui appartiennent à la famille des Polyporacées, de l'ordre des Aphylliphorales. Ils n'infestent que le bois mort des arbres vivants (Abourouh et Morelet, 1999 ; Zaremski *et al.*, 2007).

# Chapitre II : Matériel et Méthodes

## chapitre II. matériel et méthodes

### 1. Milieu d'étude

#### 1.1. Situation géographique et administrative de la cédraie de Takoucht

Le présent travail a été mené dans la cédraie de Takoucht, située à l'intérieur de la Kabylie des Babors, au sud-est de la ville de Bejaia (Fig. 4). Cette cédraie est entourée de plusieurs massifs : le mont Issek au nord, le massif de Kherrata au sud, Adrar Amellal à l'est et, enfin, Djebel Bou Amarane à l'ouest.



**Figure 4.** Localisation de la cédraie de Takoucht (Plan 2D Google Maps modifié).

Le canton forestier du Djebel Takoucht fait partie de la circonscription forestière de Souk El Tenine, dépendant de la conservation des forêts de la wilaya de Béjaïa. Il s'étend sur une superficie de 467,50 hectares. Il est situé dans la commune d'Aït Smail (Wilaya de Bejaia). Notre aire d'échantillonnage est comprise entre les coordonnées géographiques suivantes :  $36^{\circ}31'30,3''$  à  $36^{\circ}31'10,7''$  Nord et  $005^{\circ}12'01,6''$  à  $005^{\circ}12'58,6''$  Est (Fig.5).



**Figure 5.** Cédraie de Takoucht et aire d'échantillonnage (rectangle en ligne discontinue).

Au nord, il est limité par le Douar de Tala Atta de la commune d'Ait Smaït, et le Douar d'Ali Ou Mohammed de la commune de Taskriout ; au sud, par le Douars de Djermouna de la commune de kherrata ; à l'est, par Adrar Ou Mellal, et enfin, par le Douar de Tararist de la Daira de Bouandas (Wilaya de Sétif) à l'ouest.

### 1.2. Géomorphologie

Le site échantillonné est une zone montagneuse qui comporte des pentes raides et parfois des falaises, qui varient de 60 à 80%. L'altitude varie entre 1378 à 1713 m. La plupart des arbres sondés présentent une exposition nord sauf trois d'entre eux, présentant une exposition nord-ouest.

### 1.3. Géologie

La structure géologique de la région d'étude est formée par une lame de calcaire liasique sub-verticale (Duplan, 1952).

### 1.4. Sol

Le substrat est formé sur roche mère calcaire, ces sols sont superficiels, caractérisés par une forte porosité et un drainage rapide. La litière est formée généralement par les feuilles issues de la formation végétale à base de cèdre de l'Atlas et de chêne vert.

### 1.5. Végétations

La cédraie de basse altitude est mixte, dominée principalement par une formation forestière à base de cèdre d'Atlas et quelques pieds de chêne vert (*Quercus ilex*) et du genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*). Les hauteurs du mont sont caractérisées par une

cédraie pure avec une présence mineure de *Quercus ilex*, *Juniperus. oxycedrus*, *Taxus baccata* et *Acer monspessulanum*.

La strate herbacée dans le site échantillonné est riche et diversifiée. Elle est composée essentiellement des espèces suivantes : *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*, *Xeranthemum inapertum*.

### 1.6. Synthèse climatiques

La synthèse climatique repose sur la donnée de la station météorologique de Béjaïa pour la période 1974-2015 (annexe 1). Les températures et les précipitations ont été extrapolées pour l'altitude moyenne de notre aire d'échantillonnage, qui est de 1 545,5 m. Les termes correctifs proposé par Seltzer (1946) pour une élévation de 100 m d'altitude sont les suivants : 0,70 °C pour la température maximale ; 0,40 °C pour la température minimale ; 40 mm pour les précipitations (Bougaham *et al.*, 2015).

La température moyenne annuelle est de 10 °C. Le mois le plus chaud est août, avec une moyenne des maxima (M) de l'ordre de 19,22 °C. Le mois le plus froid est janvier, avec une moyenne des minima (m) de l'ordre de 1,35 °C. Le cumul moyen des précipitations annuelles est de 1409,44 mm. Le quotient pluviothermique (Q<sub>2</sub>) d'Emberger (1971), corrigé par Stewart (1969) est de l'ordre de 270,43.

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

Dans le mont Takoucht, les chutes de neige sont enregistrées à partir du mois de novembre et peuvent aller jusqu' au début du mois de mai. Les brouillards y sont fréquents (Gharzouli, 2007).

### 1.7. Etat de la cédraie

Le site échantillonné est marqué par un surpâturage et des vestiges sur pied d'un bon nombre d'arbres témoignent d'une activité élevée du régime des incendies (Fig. 6).

Quelques cas d'arbres dépéris ont été observés, mais le taux de dépérissement y est très faible.



**Figure 6.** Vestiges de cèdre de l'Atlas montrant une forte activité du feu au niveau de la Cédraie de Takoucht.

## 2. Méthodes

### 2.1. Echantillonnage

L'approche dendrochronologique a été utilisée afin d'évaluer la réponse de la cédraie de Takoucht à la variabilité climatique.

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée dans la cédraie d'étude au cours du mois d'août de l'année 2016. Elle n'a concerné que la collecte du bois vivant, reposant sur un sondage de 20 arbres sains, ne présentant aucune cicatrice, sans anomalie visible et comptant un nombre minimum de 50 cernes annuels de croissance afin de permettre la réalisation de la procédure de l'interdatation.

Deux carottes par arbre ont été prélevées sur des positions opposées (notées A et B) à l'aide d'une tarière de Pressler. Les sujets retenus ont été carottés à une hauteur d'environ 1,30 m (hauteur de la poitrine), là où le tronc est plus ou moins droit et où les cernes

présentent moins de risques de déformation (Delwaide et Filion, 2010). Les arbres de faible à moyen diamètres ont été sondés à cœur.

Des arbres retenus, certains sont légèrement inclinés. Ils ont été sondés de façon à éviter le bois de réaction (de compression), sur une position perpendiculaire à l'axe d'inclinaison (Fritts, 1976).

Les carottes extraites ont été directement mises dans des étuis en papiers. Ceci facilite leur transport et minimise grandement le risque de détérioration des échantillons entre le travail de terrain et leur manipulation au laboratoire.

Enfin, les cavités créées par le carottage ont été obturées avec du mastic à bois afin d'assurer une meilleure protection des arbres échantillonnés (Fig. 7).



**Figure 7.** Carottage d'un cèdre de l'Atlas : a) prélèvement d'une carotte l'aide d'une tarière de Pressler, b) carotte fraîchement extraite, c) préservation de l'échantillon recueilli dans un étui en papier et d) comblement de la cavité créée après carottage avec du mastic à bois.

### 2.1.1. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été laissés sécher graduellement à l'air libre, dans leurs étuis, ce qui permet d'éviter l'apparition de craquelures sur les surfaces à dater. Ils ont ensuite été montés (collés avec de la colle à bois) sur des supports en bois rainurés, avant d'être ponçés (FIG 8). Le ponçage a été effectué à la main, avec du papier de verre, en commençant par un papier grossier, puis, graduellement, avec des papiers de plus en plus fins afin d'améliorer la lisibilité des cernes annuels de croissance (Yamaguchi et Brunstein, 1991).

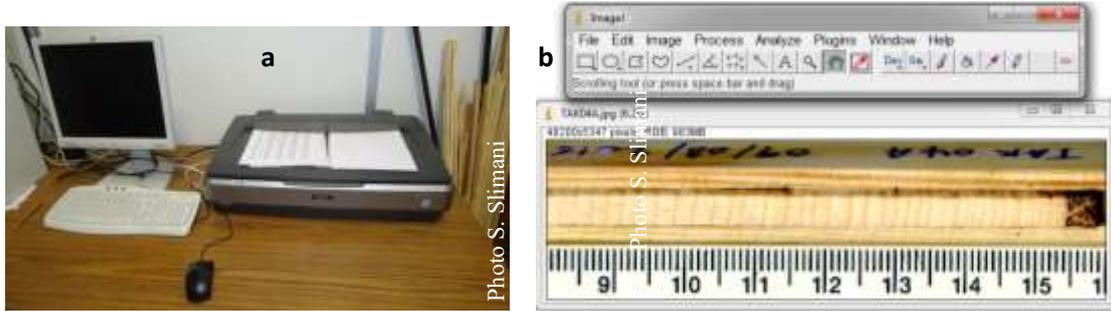


**Figure 8.** Préparation des échantillons pour la datation et mesure de largeurs des cernes annuels de croissance : a) séchage des carottes dans leurs étuis à l’air libre, b) carotte montée sur un support en bois rainuré c) différents calibre de papiers à sabler utilisés dans l’opération de ponçage des échantillons et d) partie d’une surface d’une carotte (échantillon TAK 07A) après ponçage, permettant une bonne lisibilité des cernes annuels de croissance.

### 2.1.2. Datation et mesure de cernes

La datation des échantillons a été effectuée sous un système d’imagerie numérique, constitué d’un numériseur (scanner) haute définition associé à un logiciel de datation et de mesure de largeurs de cernes, ImageJ (Ferreira et Rasband, 2012).

Cette technique permet de dater les arbres sondés directement sur les images obtenues de la numérisation des carottes montées et poncées, avant de passer à la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance avec une précision supérieure à 0,01 mm (FIG. 9).



**Figure 9.** Système d'imagerie numérique utilisé dans datation et la mesure de largeurs des cernes de croissance : a) scanner haute définition (Laboratoire de dendrochronologie, Université de Barcelone) associé à b) un logiciel spécialisé, *ImageJ* (Ferreira et Rasband, 2012).

Connaissant la date de formation du dernier cerne sous l'écorce des arbres sondés, qui est 2016, la datation des échantillons recueillis s'est reposée sur le simple comptage à partir de ce cerne en direction de la moelle.

Dans un premier temps, les chronologies individuelles ont été établies visuellement pour chaque échantillon par la méthode de représentation schématique (*skeleton plot*), qui est basée sur l'identification de cernes diagnostiques (ou caractéristiques) selon les techniques classiques largement éprouvées en dendrochronologie décrites par Douglass (1946) et Stokes et Smiley (1996). Ensuite, l'interdatation (*crossdating*) des échantillons a permis de s'assurer du bon calage chronologique des séries élémentaires (Lebourgeois et Mérian, 2012). Cette méthode constitue le meilleur moyen de vérifier l'agencement synchrone des séries chronologiques afin de corriger d'éventuelles erreurs de datation, dues notamment aux cernes absents et à la présence de faux cernes, et d'assigner à chaque cerne de croissance l'année exacte de sa formation (Douglass, 1939, 1946 ; Fritts, 1976).

Dans le cadre de cette étude, la chronologie maîtresse du site échantillonné (ou chronologie de référence ou encore chronologie moyenne) a été établie après mesure des largeurs de cernes et contrôle statistique de l'interdatation.

La mesure de chaque largeur de cerne annuel de croissance a été réalisée en prenant le soin de bien orienter l'axe de mesure afin qu'il soit parfaitement perpendiculaire à la limite des cernes (Delwaide et Fillion, 2010). En effet, sortir de cet axe conduit à établir une fausse chronologie, car les valeurs enregistrées sont dans ce cas soit surestimées ou sous-évaluées.

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

Le comptage des cernes visibles uniquement ne donne pas automatiquement la datation exacte des échantillons, notamment si ces derniers sont recueillis d'une région qui subit une grande variabilité des conditions environnementales comme la nôtre (Touchan *et al.*, 2010). En effet, ceci peut conduire à la formation de faux cernes ou l'apparition de cernes incomplètement formés, voire absents à un ou des niveaux donnés de la tige (Delwaide et Filion, 2010). Ce qui pose un vrai problème dans la datation des échantillons. Dans notre cas, ce risque est encore plus grand, vu que le site d'étude est perturbé : entre autres, il subit un pâturage intensif et il est régulièrement incendié, augmentant ainsi le risque d'apparition des anomalies de croissance citées ci-dessus (Delwaide et Filion, 2010).

Le contrôle statistique de la qualité de l'interdatation a été réalisé avec le programme COFECHA (Holmes, 1983). Ce dernier fonctionne avec un fichier d'entrée sous format \*.rwl ou format Tucson. Or, le logiciel ImageJ génère les mesures des largeurs de cernes sous format \*.xls (Excel). Ainsi, la donnée est dans un premier temps mise sous format \*.txt (texte). Ensuite, ce dernier a été transformé avec le programme CASE en fichier \*.cpt (format Corel Photo-Paint Bitmap). Enfin, le fichier \*.rwl est obtenu en transformant le fichier \*.cpt avec le programme FMT.

Le programme COFECHA permet de vérifier la fiabilité de l'interdatation en corrélant les segments successifs d'une série élémentaire donnée avec une chronologie de référence issue des séries élémentaires restantes. La longueur du segment de cernes utilisé est de 50 ans. Pour un recouvrement de 50 % à chaque étape de vérification, les segments successifs sont décalés de 25 ans. Le fichier de sortie généré par ce programme contient, entre autres, la liste d'éventuels cernes absents (section 1), un tableau récapitulatif des corrélations par segment de chaque séquence de chaque série avec la chronologie maîtresse (section 5), ainsi qu'un listing des problèmes potentiels traduits par une faible corrélation (section 6).

Les erreurs potentielles signalées par COFECHA ont été vérifiées sur le bois et des corrections ont été apportées si nécessaires. Car avant tout, COFECHA est juste un outil statistique d'aide à la décision, les modifications ne concernent pas automatiquement tous les problèmes statistiques de datation signalés.

### 2.3. Analyse de la croissance radiale

#### 2.3.1. Analyse de la chronologie maîtresse brute

La chronologie maîtresse brute a été établie à partir de des largeurs annuelles moyennes des cernes, élaborée à partir des arbres datés avec succès. Une courbe de moyennes mobiles de 20 ans décalées d'une année est ajoutée afin de mettre en évidence la tendance de l'effet de l'âge de l'arbre sur l'évolution de l'épaisseur du cerne annuel de croissance.

#### 2.3.2. Evolution la sensibilité moyenne

La sensibilité moyenne quantifie la sensibilité des arbres au climat et exprime l'ampleur des changements affectant à court terme la largeur des cernes, donnant ainsi une estimation de l'impact des fluctuations climatiques interannuelles sur ces derniers (Fritts, 1976).

La sensibilité ( $S_x$ ) a été calculée pour la chronologie maîtresse brute. Elle repose sur la différence relative en valeur absolue entre deux épaisseurs de cernes successifs (Fritts, 1976), selon la formule 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 20 ans décalée d'une année sur l'ensemble de la chronologie maîtresse brute.

#### 2.3.3. Standardisation

Le programme ARSTAN (Cook, 1985 ; Cook et Holmes, 1999) a été utilisé pour standardiser la chronologie maîtresse ainsi que les chronologies individuelles représentant chaque arbre sondé.

La standardisation constitue une étape importante dans le traitement des séries dendrochronologiques pour une étude climatique (Cook, 1985). Elle a pour objectif premier de transformer les valeurs de largeurs de cerne en indices de croissance uniforme, et en second lieu d'éliminer les signaux non désirés et ainsi mettre en évidence le signal climatique (Nicault *et al.*, 2010). Elle tend ainsi vers une uniformisation des variations de la croissance indépendamment des effets liés à l'âge de l'arbre, à la compétition et à d'éventuelles perturbations (Fritts, 1976).

La procédure de la standardisation des séries chronologiques est passée dans un premier temps par l'établissement d'une courbe de croissance théorique. Cette dernière a été par la suite utilisée pour le calcul des indices de croissance par division de chaque valeur mesurée par la valeur théorique de largeur du cerne correspondant.

Vu la forte perturbation que subit continuellement la cédraie de Takoucht, nous avons opté pour la méthode d'estimation de la courbe théorique par lissage, la mieux adaptée à ce genre de milieux (Nicault *et al.*, 2010), en utilisant la fonction spline cubique de lissage avec une fenêtre définie à 67 % de la longueur de la série (Cook, 1985 ; Cook et Briffa, 1990).

Pour diminuer la persistance des effets non liés aux variations climatiques, les séries d'indices de croissance sont soumises à un traitement qui élimine les autocorrélations (l'effet des années antérieures sur la croissance de l'année en cours). De ce processus résultent trois chronologies ajustées, nommées (1) chronologie standard, (2) chronologie résiduelle et (3) chronologie Arstan. L'analyse du fichier de sortie permet de savoir laquelle des chronologies est la meilleure pour l'étude dendroclimatique.

La sensibilité moyenne (définie précédemment), l'autocorrélation d'ordre 1, l'intercorrélacion moyenne, la variance du premier vecteur propre et le signal exprimé dans la population ou EPS (*Expressed population signal*) sont les principales statistiques utilisées pour caractériser le signal climatique contenu dans les chronologies obtenues.

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

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

Le premier vecteur propre exprime le plus fort pourcentage de la variance totale d'un nuage de points, qui reflète la qualité du signal climatique contenu dans les cernes de croissance (Slimani, 2014).

L'EPS constitue un très bon paramètre pour quantifier la force du signal commun entre les séries individuelles. Il évalue la robustesse des chronologies utilisées dans le cadre des études climatiques, notamment dans la reconstitution du climat passé. Dans la présente étude, la longueur de la chronologie finale utilisée dans l'analyse cerne-climat est basée sur un seuil d'EPS de 0,85 couramment utilisé pour admettre la bonne représentativité de la chronologie moyenne (Wigley *et al.*, 1984).

#### **2.4. Evolution de l'indice de croissance (chronologie résiduelle)**

La chronologie maîtresse standardisée affichant les meilleurs paramètres statistiques dans la caractérisation du signal climatique a été utilisée afin d'analyser l'évolution de l'indice de croissance dans le temps. Aussi, une comparaison a été faite avec la chronologie brute pour mettre en exergue l'effet de la procédure de la standardisation.

#### **2.5. Fréquences relatives en cernes épais et en cernes minces**

Le cerne diagnostique fait référence aux cernes dont les valeurs de l'indice de croissance sont extrêmes. Dans cette étude, le cerne est considéré mince quand il est inférieur à la valeur « moyenne – écart-type » et large quand il est supérieur à la valeur « moyenne + écart-type », seuils utilisés par Slimani (2014) pour les cédraies du Djurdjura et des Aurès.

Les années avec une croissance remarquable sont identifiées pour chaque série individuelle standardisée. La période d'analyse retenue s'est basée sur le seuil EPS de 0,85. Les années dont la croissance du cerne est extrême ont été listées au préalable sur le fichier de sortie du programme COFECHA (annexe 2). Les fréquences relatives des chronologies en cernes minces et larges ont été calculées pour chaque année, puis présentées sous forme d'histogrammes en prenant en considérant le nombre d'arbres affichant une croissance extrême par rapport au nombre total d'arbres datés.

#### **2.6. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les arbres**

Dans le but d'analyser l'intensité du signal climatique enregistré dans les cernes annuels de croissance, l'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée sur la période commune allant de 1848 à 2016 impliquant 12 chronologies individuelles résiduelles. Le graphique éboulis des valeurs propres accompagné du test de bâtons brisés est utilisé pour déterminer les composantes significatives traduisant la similarité de croissance entre les arbres due au climat (Andreu *et al.*, 2007 ; Slimani, 2014).

L'évolution de la variance commune de la croissance entre les arbres est évaluée sur des moyennes mobiles de 20 ans décalées d'une année.

### **3. Relation cerne-climat**

Les données climatiques utilisées dans le cadre de cette étude ont été fournies par la station météorologique de Béjaïa. Elles couvrent la période 1974-2007 (annexe 1).

Le programme Seascorr (Meko *et al.*, 2011) a été utilisé dans l'analyse des corrélations entre l'indice de croissance (variable indépendante) et deux variables climatiques saisonnières

(variables indépendantes) : 24 régresseurs climatiques mensuels (12 valeurs pour les données de précipitations et 12 valeurs pour les températures moyennes). Les résultats sont rapportés sur les périodes individuelles d'un mois, sur des périodes saisonnières de trois mois ainsi que sur les périodes de neuf et de 12 mois.

Pour une bonne estimation de la stabilité de la relation cerne-climat, Seascorr calcule les corrélations entre les variables climatiques et l'indice de croissance pour la période totale d'analyse ainsi que pour deux sous-périodes, en divisant la période totale en deux jeux de données. Dans cette étude, les résultats sont donnés pour les périodes suivantes : (1974-2007) (période totale), 1975-1991 (première sous-période) et 1992-2007 (deuxième sous-période).

# Chapitre III : Résultats et Discussions

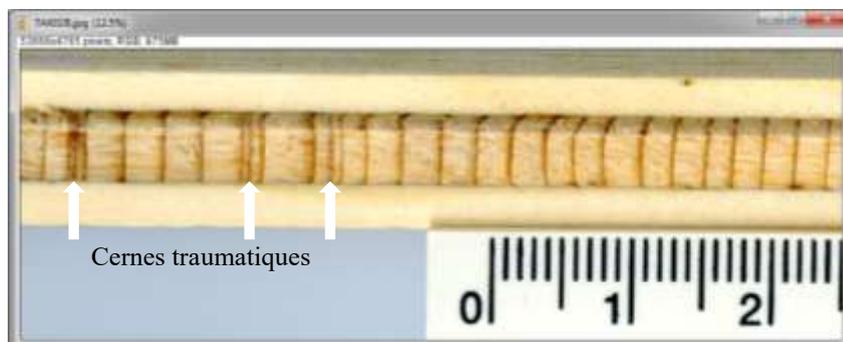
#### III. Résultats et discussion

##### 1. Contrôle statistique de l'interdatation et développement des séries chronologiques

Deux types d'erreurs de datation ont été identifiés sous COFECHA. Le site d'étude étant fréquemment incendié, certaines carottes présentent des cicatrices de feu (Fig. 10), d'autres montrent un nombre très élevé de cernes traumatiques (Fig. 11), formés de rangées tangentiels de canaux résinifères produites en réaction à des dégâts liés au passage d'un incendie, mais aussi à une attaque d'insectes ou de champignons, voire à simple impact mécanique (Thompson et Sifton 1925 ; Fahn *et al.*, 1979 ; Nagy *et al.*, 2000 ; Langenheim 2003 et Hudgins *et al.*, 2004 *in* Bollschweiler *et al.*, 2008). Ces anomalies morphologiques visibles peuvent fausser la datation car quand elles sont formées au milieu de la saison de croissance, elles peuvent être, dans certaines situations, facilement prises pour de vrais cernes. Aussi, quand elles sont formées à la limite du cerne, elles peuvent déformer toute la zone du bois final : cette dernière devient invisible et deux cernes annuels de croissance peuvent ainsi être comptés comme une seule année. D'autres erreurs ont été identifiées sur certaines carottes présentant des cernes absents.



**Figure 10.** Carotte de cèdre de l'Atlas de la forêt de Takoucht montrant une cicatrice de feu (échantillon TAK13B). Photo ImageJ.

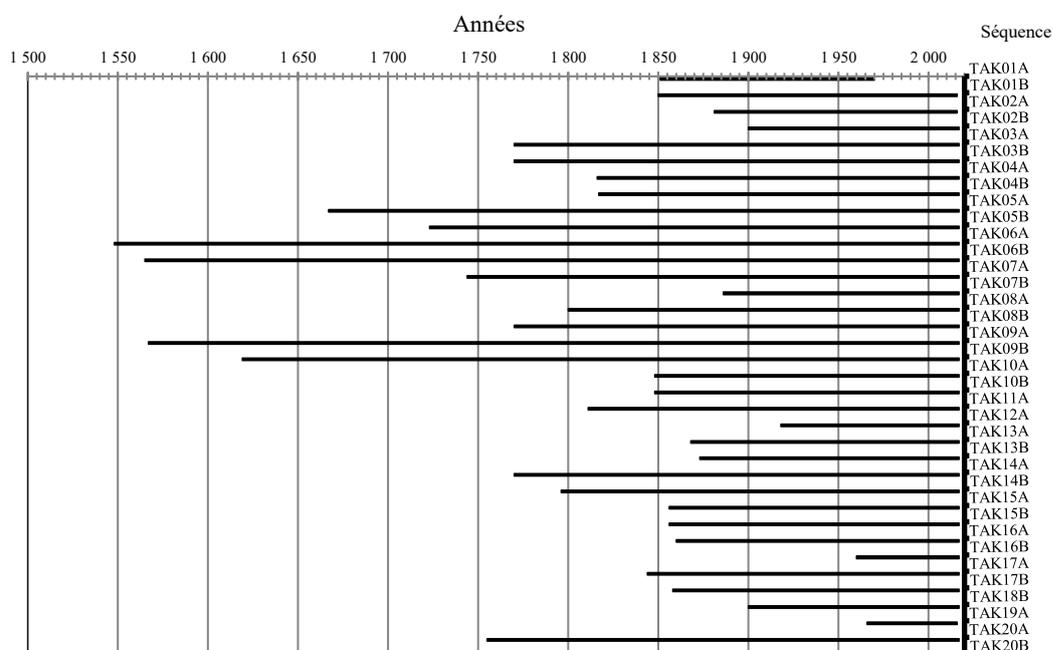


**Figure 11.** Carotte de cèdre de l'Atlas de la forêt de Takoucht portant des canaux résinifères traumatiques à plusieurs endroits (échantillon TAK02B). Photo ImageJ.

### III. Résultats et Discussions

Les résultats du contrôle statistique de l'interdatation sont consignés sur la figure 11 et dans le tableau 1.

La longueur des chronologies individuelles est très variable (Fig. 12). A titre indicatif, la série la plus longue s'étend sur 469 ans ; la chronologie la plus courte s'étale quant à elle sur seulement 50 ans. Néanmoins, la moitié des arbres carottés dépassent les 200 ans. Cela dit, il y a lieu de signaler que dans la plupart des cas, ces longueurs ne reflètent pas l'âge de l'arbre. Dans la majorité des cas, les arbres sondés sont si gros que la tarière n'y atteint pas le cœur. Aussi, certaines parties des carottes collectées n'ont pas été prises en considération, car leur datation n'a pas été concluante. Pour la même raison, quatre des 40 carottes collectées (d'arbres différents) ont été écartées de l'analyse car ce problème s'est posé à plusieurs endroits, ce qui n'a pas permis l'obtention de séries correctement datées avec au moins 50 cernes annuels de croissance.



**Figure 12.** Diagramme des longueurs des chronologies individuelles généré par le programme COFECHA (modifié).

La chronologie maîtresse établie sur 20 arbres s'étale de 1548 à 2016 (tableau 1). Seize cernes absents (0,21 % du total des cernes datés) ont été identifiés : un en 1678, un en 1751, un 1753, quatre en 1859, un en 1870, deux en 1875, un en 1879, un en 1939, un en 1951, un en 1994, un en 2002 et un en 2009.

### III. Résultats et Discussions

Des cernes absents en 2002 ont aussi été signalés pour les cédraies des Aurès et pour le Djurdjura par Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) et Slimani *et al.* (2014). En outre, il est à signaler qu'environ la moitié des années avec cernes absents ont été enregistrées à partir de la troisième décennie du XX<sup>e</sup> siècle. Le nombre maximal de cernes absents identifiés sur une carotte est de quatre (échantillon TAK06A). Le coefficient d'intercorrélation entre toutes les carottes datées est de 0,52, et la sensibilité moyenne de tous les arbres sondés est de 0,29.

**Tableau 1.** Principales caractéristiques de la chronologie maîtresse

Principales caractéristiques	Statistiques
Nombre d'arbres	20
Nombre de carottes datées	36
Série maîtresse	1548-2016
Nombre d'années	469
Nombre total de cernes	7588
Nombre de cernes absents	16 (0,21%)
Intercorrélation	0,52
Sensibilité moyenne	0,29

Des résultats similaires, avec peu de cernes absents sur des séries relativement longues et une intercorrélation relativement faible ont été rapportés par Slimani (2014) pour les cédraies du massif du Djurdjura. Par ailleurs, Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) et Slimani *et al.* (2014) ont identifié un pourcentage en cernes absents plus important au niveau des cédraies de la région des Aurès, caractérisée par des arbres affichant un coefficient d'intercorrélation plus élevé.

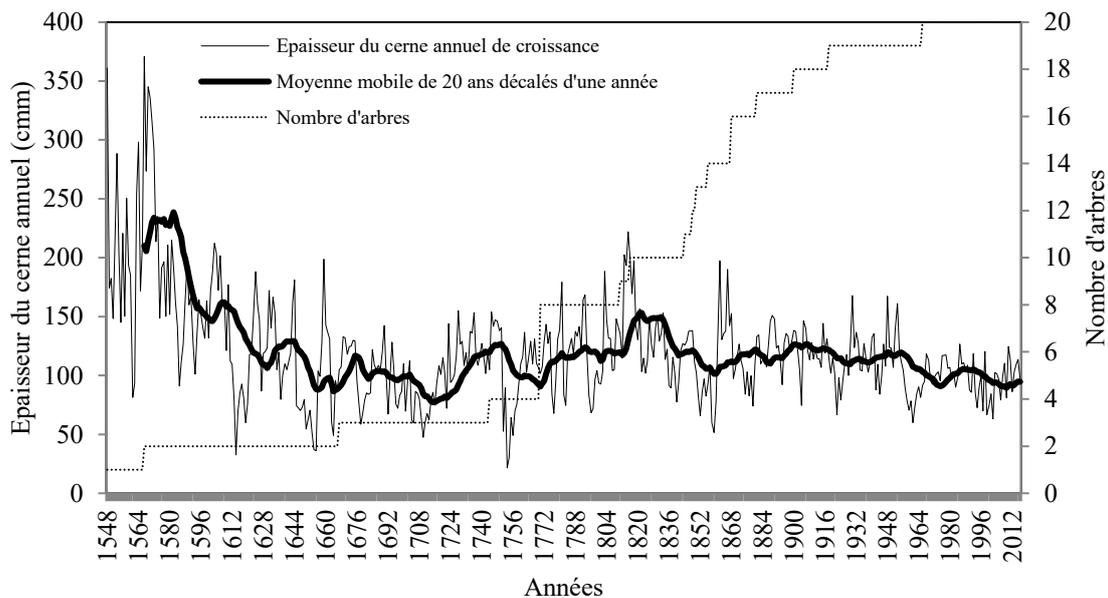
Cependant, contre toute attente, la sensibilité moyenne de nos arbres est similaire à celle notée par Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) et Slimani *et al.* (2014) au niveau de la région des Aurès ; les arbres sondés par Slimani (2014) au niveau du massif du Djurdjura affichent une sensibilité moyenne plutôt faible à la nôtre. Située à la limite du Sahara, la région des Aurès présente des conditions plus contraignantes à la croissance des arbres. Les arbres qui s'y développent sont plus sensibles à la variabilité climatique que ceux qui croissent au niveau de l'Atlas tellien, proche de la mer méditerranéenne (Slimani, 2014).

Certes notre cédraie d'étude est plus proche de la mer que celles du Djurdjura, néanmoins le choix des arbres sondés semble être le facteur le plus déterminant. En effet, nos échantillons ont été obtenus sur des cèdres se développant dans des conditions très limitantes, avec notamment une pente raide, un sol peu profond, une porosité importante, voire, parfois, sur dalle rocheuse.

## 2. Analyse de la croissance radiale

### 2.1. Analyse de la chronologie maîtresse brute

Les largeurs annuelles moyennes des cernes de la chronologie maîtresse élaborée à partir des 38 séries individuelles sont présentées sur la figure 13. Comme signalé précédemment, cette chronologie s'étale sur 469 ans, de 1548 à 2016. L'épaisseur moyenne est de 1,20 mm ; la valeur la plus élevée a été enregistrée en 1566, avec 3,70 mm, et la valeur la plus faible a été obtenue en 1753, avec un cerne de 0,21mm.



**Figure 13.** Courbe de croissance de la cédraie de Takoucht exprimée en valeurs brutes des largeurs de cernes annuels. Les moyennes mobiles sont présentées sur la dernière année de chaque période.

La Figure 13 présente l'allure de l'épaisseur moyenne du cerne annuel de croissance qui est influencée par un grand nombre de facteurs environnementaux. En effet, l'épaisseur du cerne reflète un bilan annuel de la croissance radiale (Nicault et *al.*, 2010).

L'examen de cette figure met en évidence une courbe avec une tendance à la décroissance de l'épaisseur du cerne au fur et à mesure que les arbres vieillissent. Cette tendance est plus nette sur la courbe obtenue avec des moyennes mobiles de 20 ans décalées d'une année.

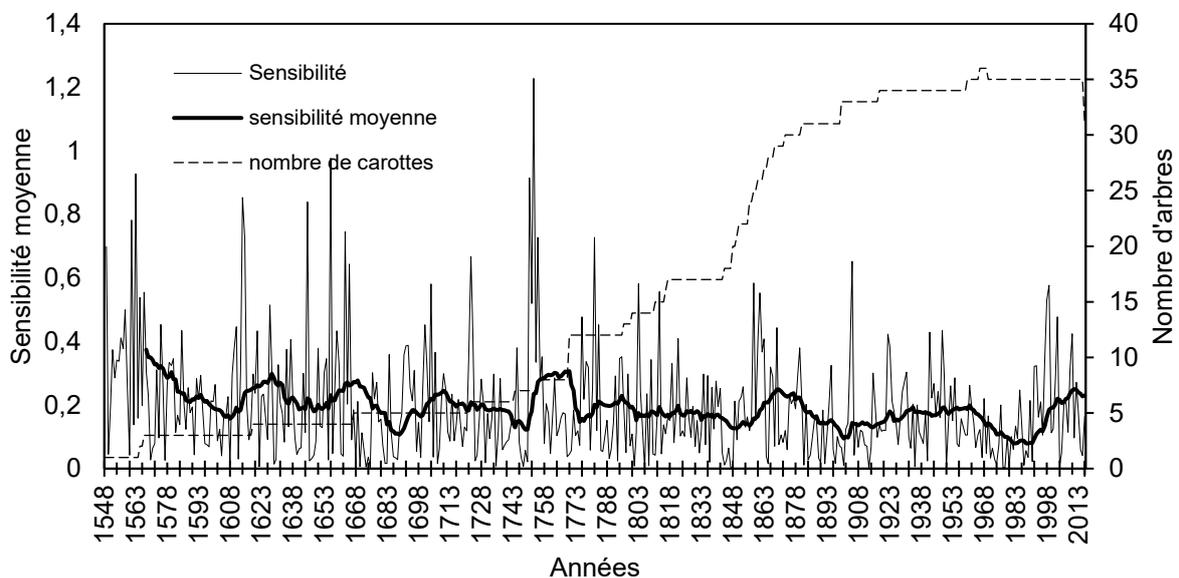
Il s'agit d'un effet lié à l'âge, qui résulte du fait qu'en général l'arbre élabore des cernes larges dans son jeune âge. Par la suite, ses accroissements sont plus fins puis se stabilisent

jusqu'à sa mort (Nicault *et al.*, 2010 ; Lebourgeois et Mérian, 2012). Cette décroissance reflète la progression géométrique de la circonférence des cernes au fur et à mesure que le diamètre des arbres augmente (Fritts, 1976 ; Cook *et al.*, 1990).

#### 2.2. Evolution la sensibilité moyenne

L'évolution de la sensibilité moyenne, calculée pour des moyennes mobiles de 20 ans décalées d'une année est présentée sur la figure 14. Notre cédraie d'étude affiche une très haute variabilité de la sensibilité moyenne. Parce que cette dernière est calculée sur les valeurs brutes, sans standardisation de la donnée, sa variabilité serait influencée aussi bien par la variabilité climatique que par d'autres conditions spécifiques au site d'étude (édaphiques et topographiques notamment).

La courbe affiche une fluctuation cyclique de la sensibilité moyenne, dont le pic principal est obtenu au début de la chronologie, quand les arbres sont plus ou moins jeunes. Une augmentation de la sensibilité moyenne est aussi enregistrée au cours des dernières décennies. La même tendance a été signalée par Slimani (2014) et Slimani *et al.* (2014) pour les cédraies du Djurdjura et de la région des Aurès.



**Figure 14.** Evolution dans le temps de la sensibilité des cèdres sondés. Pour la courbe de la sensibilité moyenne, exprimée par des moyennes mobiles de 20 ans décalés d'une année, les valeurs sont présentées sur la dernière année de chaque période.

2.3. Standardisation

La standardisation de la série chronologique nous a fourni les principales statistiques consignées dans le tableau ci-après.

**Tableau 2.** Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN dans la cédraie de Takoucht (STD=Standard; RES=Résiduelle; ARS=Arstan).

Type de chronologie	STD	RES	ARS
Moyenne	0,96	0,99	0,96
Médiane	0,97	0,99	0,97
Sensibilité moyenne	0,21	0,23	0,20
L'écart type	0,25	0,20	0,23
Autocorrélation d'ordre 1	0,53	-0,0005	0,47

Les trois chronologies ont des coefficients de sensibilité moyenne appréciables. La valeur la plus élevée est enregistrée par la chronologie résiduelle avec une valeur de 0,23. Une valeur comparable a été rapportée par Slimani (2014) pour la cédraie de Tigounatine dans le Djurdjura. Par contre, une plus forte sensibilité a été notée par Kherchouche *et al.*(2013), Slimani (2014) et Slimani et al. (2014), dans les cédraies de la région des Aurès, et Ilmen *et al.* (2013) dans les cédraies marocaines. Comme noté précédemment, cette différence est principalement due aux conditions climatiques, plus douces au niveau de notre zone d'étude ; très limitantes à la croissance des arbres au niveau de la limite méridionale de la distribution naturelle du cèdre de l'Atlas.

La valeur de la médiane est presque égale à la moyenne pour les trois chronologies générées par Arstan et l'écart-type le plus faible est enregistré par la chronologie résiduelle, affichant ainsi la plus faible variabilité de la croissance. En outre, le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 affiche une valeur négative et proche de zéro pour la chronologie résiduelle. Ceci justifie l'élimination de la rémanence des conditions antérieures de croissance persistante dans les chronologies standard et arstan.

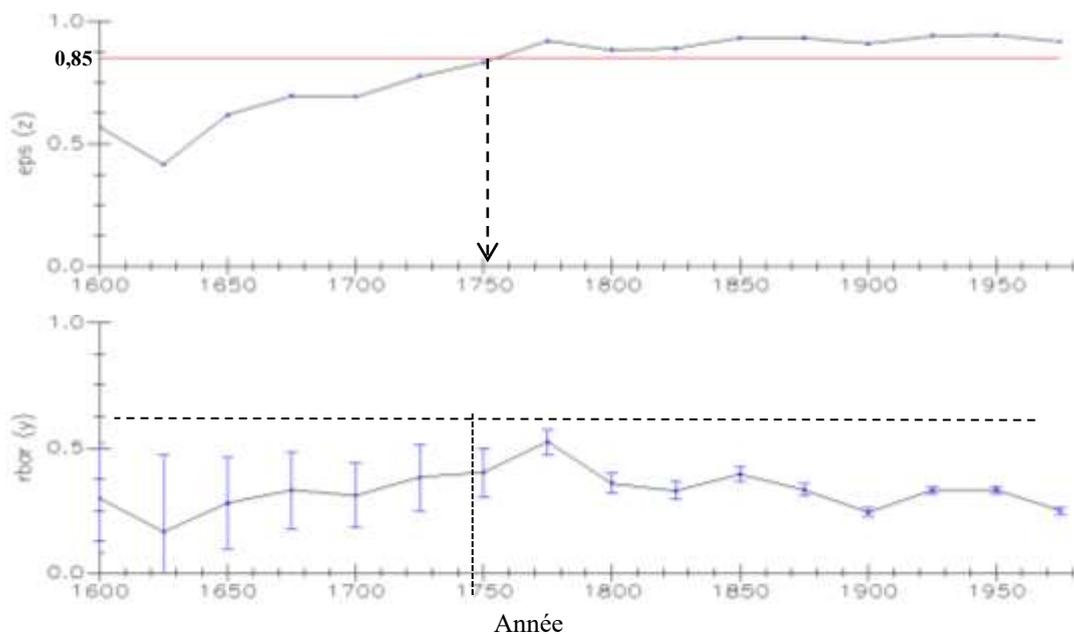
**Tableau 3.** Corrélations moyennes et variance du premier vecteur propre (VP) de la série résiduelle pour la cédraie de Takoucht.

	STD	RES
Corrélations moyennes		
Toutes les carottes	0,461	0,544
Entre arbres	0,185	0,273
Intra-arbres	0,460	0,530
Variance du 1 <sup>er</sup> VP %	23,38%	31,45%

### III. Résultats et Discussions

La chronologie résiduelle affiche les corrélations moyennes et la variance exprimée par le premier vecteur propre les plus élevées par rapport à la chronologie standard (Tableau 3). Ces paramètres statistiques reflètent la force du signal commun entre les séries élaborées, traduisant ainsi un meilleur signal climatique capté dans la chronologie résiduelle. Il est à signaler que les corrélations entre toutes les carottes collectées ainsi qu'entre les arbres sondés sont relativement faible par rapport à celles signalées par Slimani (2014) pour quelques peuplements du Djurdjuda, mais elles restent tout de même appréciables.

En définitive, les différents paramètres obtenus de la standardisation de la chronologie maîtresse justifie le bon choix de l'utilisation de la chronologie résiduelle pour l'analyse cerne-climat. Cette dernière est basée sur une valeur EPS de 0,85, obtenue avec un minimum de huit échantillons : elle correspond à la période couverte par la chronologie résiduelle de 1751 à 2016 pour laquelle la barre d'erreur du coefficient de corrélation de Pearson entre les chronologies individuelles est faible (Fig. 14).



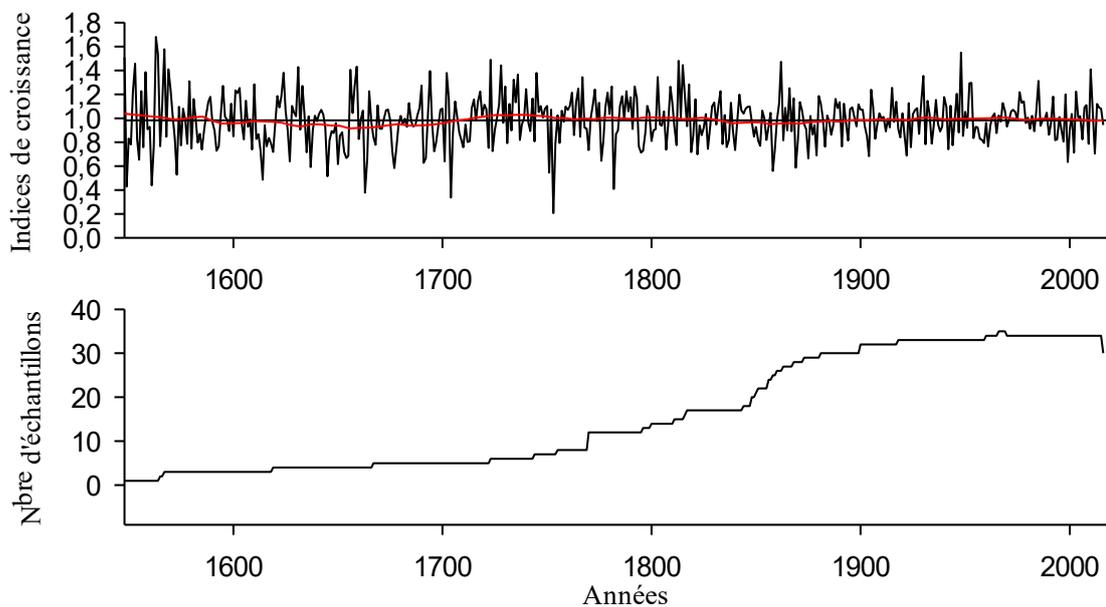
**Figure 15.** Evolution de l'EPS et de la barre d'erreur du coefficient de corrélation de Pearson. Courbes générés par le programme Arstan (modifié).

#### 2.4. Evolution de l'indice de croissance (chronologie résiduelle)

La chronologie résiduelle montre une variabilité interannuelle de l'indice de croissance élevée (Fig. 15). L'allure de la courbe montre que la standardisation a éliminé l'effet lié à l'âge de l'arbre sur la croissance radiale, affichée par la courbe de croissance de la

chronologie maîtresse brute (Fig. 13, page 28). La valeur de l'indice la plus forte a été enregistrée en 1563 (1,68), et la valeur la plus faible a été obtenue en 1753 (0,208).

L'examen de la courbe de l'indice de croissance pour un seuil EPS de 0,85 (période de 266 ans, 1751-2016) montre qu'il y a quasiment autant d'indices supérieurs (132) qu'inférieurs (134) à la moyenne. Le nombre d'années avec un indice de croissance affichant une valeur extrême est important au cours du dernier siècle. Cette tendance est plus prononcée pour les indices avec une valeur inférieure à la moyenne, notamment au cours des dernières décennies. Des résultats similaires ont été rapportés par Slimani (2014) pour le massif du Djurdjura et la région des Aurès. La tendance au déclin de la croissance radiale à partir de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle a été notée comme une régression généralisée pour le patrimoine forestier mondiale (Latte, 2015 ; Rubino *et al.*, 2004).



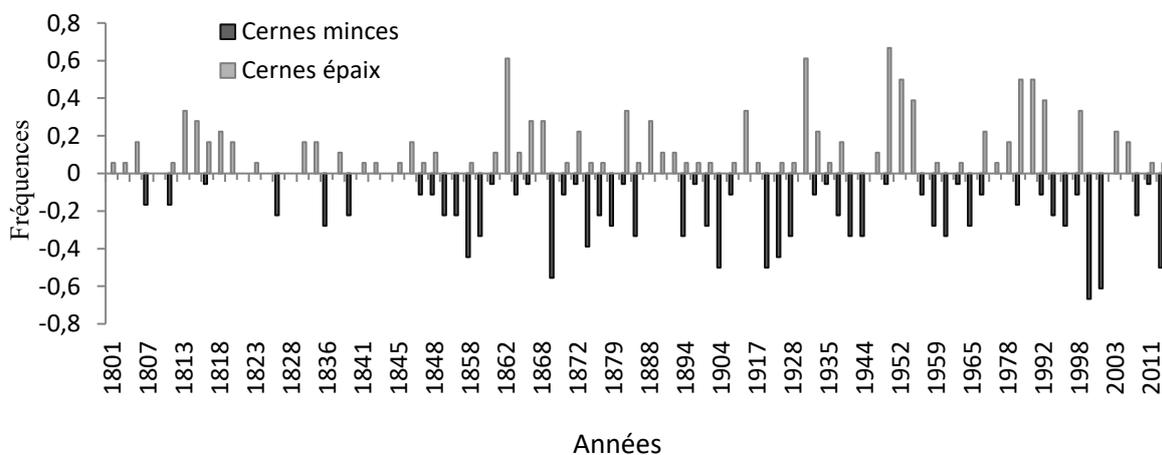
**Figure 16.** Chronologies maîtresse résiduelle pour la cédraie de Takoucht.

#### 2.5. Fréquences relatives en cernes épais et en cernes minces

Les fréquences relatives en cernes épais et minces, représentant les cernes caractéristiques, pour la période couverte par l'indice de croissance au seuil EPS de 0,85 sont présentées sur la figure 17. La chronologie maîtresse a enregistré 63 cernes épais et 53 cernes minces sur une période de 210 ans. La figure 17 révèle une tendance nette à l'augmentation de cernes diagnostiques avec le temps. Cette tendance est plus prononcée durant le dernier siècle au cours duquel sont enregistrées les fréquences relatives les plus élevées en cernes épais (1948, 1953, 1983, 1985 et 1998) et en cernes minces (1944, 1961, 1965, 1997, 1999, 2002 et 2012). Ceci dénote la grande variabilité climatique enregistrée au cours des dernières

### III. Résultats et Discussions

décennies. En outre, cette tendance est marquée davantage par les fréquences relatives en cernes minces, reflétant ainsi la récurrence des années sèches au cours des dernières décennies. Des résultats similaires ont été avancés pour le Bassin méditerranéen par plusieurs auteurs (Esper *et al.*, 2007 ; Touchan *et al.*, 2008, 2016, 2017 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014). Cependant, pour le Djurdjura et la région des Aurès, Slimani (2014) et Slimani *et al.* (2014) ont noté la fréquence relative en cernes minces la plus forte pour l'année 2002, traduisant l'année la plus sèche dans les deux zones d'étude au cours des périodes d'analyses considérées. Dans notre cas, l'année 2002 a enregistré la deuxième fréquence la plus forte après celle obtenue en 1999. Cependant, les deux fréquences sont très proches : 0,61 pour 2002 ; 0,66 pour 1999. La fréquence relative en cernes diagnostiques étant plutôt un paramètre traduisant le nombre d'arbres ayant enregistré un indice mince ou épais par rapport au nombre total des arbres considérés, le choix des arbres à sonder est à prendre en considération. En effet, le carottage de quelques arbres peu sensibles par rapport aux autres, entraînerait automatiquement une légère diminution de la fréquence relative en cernes minces de la population échantillonnée. Par ailleurs, plusieurs études menées en Afrique du Nord sur plusieurs essences forestières ont souligné que les cernes élaborés en 1999 et 2002 ont été soit minces ou carrément absents (Touchan *et al.*, 2008, 2016, 2017 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Ilmen *et al.*, 2013 ; Ilmen, 2014 ; Slimani, 2014 ; Slimani *et al.*, 2014 ; Bachtobj-Bouachir *et al.*, 2017). Hoerling et Kumar (2003) caractérisent la période de 1999 à 2002 d'une sévère sécheresse, qui s'est répandue au sud de l'Hémisphère Nord et de latitude moyennes atteignant les Etats Unies, la Méditerranée, le Sud de l'Europe, le Sud-Ouest de l'Asie ainsi que l'Asie centrale.

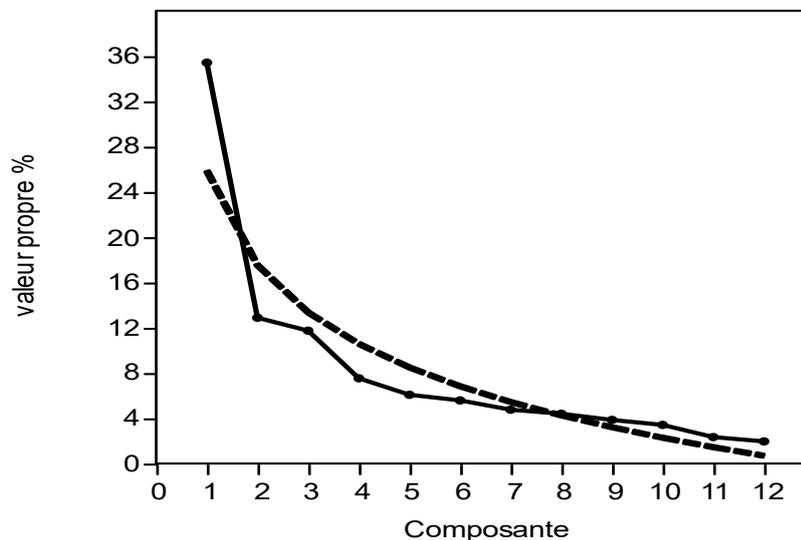


**Figure 17.** Fréquences relatives en cernes épais et minces sur la période relative à l'indice de croissance au seuil EPS de 0,85.

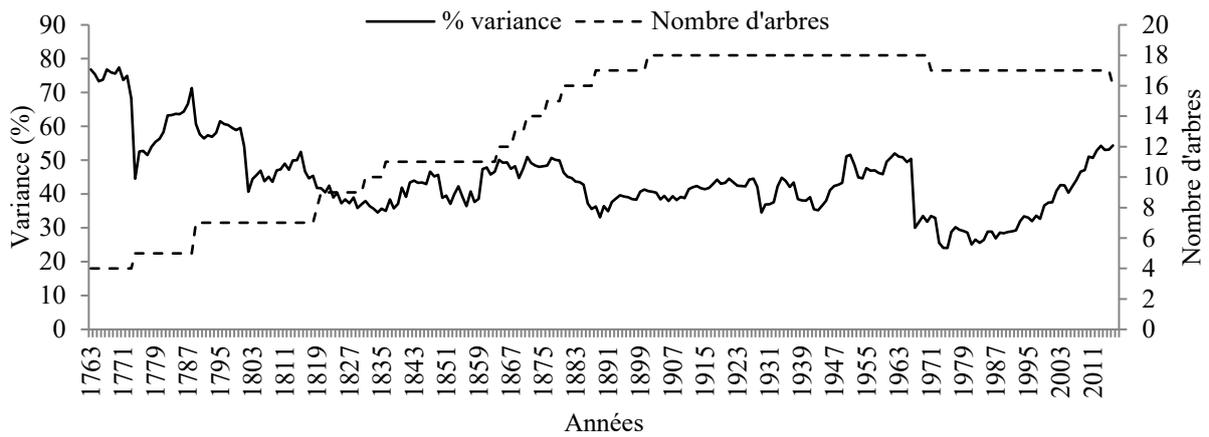
Un bon nombre de nos années avec cernes minces coïncide avec des années de sécheresse sévères rapportées par plusieurs auteurs en Algérie (Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014 ; Slimani *et al.*, 2014 ; Garah *et al.*, 2016) et dans la région méditerranéenne (Touchan *et al.*, 2008, 2016, 2017 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013; Ilmen *et al.*, 2013; Ilmen, 2014). Ces années sont surtout concentrées sur les dernières décennies, à l'image de la série enregistrée en 1997, 1999 et en 2002.

#### 2.6. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les arbres

Le graphique éboulis des valeurs propres issu de l'analyse en composantes principales impliquant 12 chronologies résiduelle individuelles sur la période commune 1848-2016 est illustré sur la figure 18. Cette dernière révèle que les composantes principales 1, 9, 10, 11 et 12 sont significatives au seuil  $\alpha = 0,05$ , avec les valeurs de la variance respectives de 35,19 %, 3,84 %, 3,41 %, 2,33 % et 2 %. Avec le pourcentage d'information le plus élevé, la CP1, traduit le signal climatique commun entre les arbres échantillonnés. C'est la composante qui est retenue pour le reste de l'analyse. Les CP9, 10, 11 et 12 reflètent la présence d'un bruit résiduel qui n'aurait pas été totalement éliminé lors de la standardisation (effet dû aux perturbations endogènes, dont le feu, et aux conditions spécifiques à l'emplacement de chaque arbre sondé).



**Figure 18.** Graphique éboulis des valeurs propres (ligne continue) et test de bâtons brisés (ligne en pointillé) pour Takoucht. Les composantes sont significatives lorsque la courbe des valeurs propres passe au-dessus de la courbe générée par la procédure des bâtons brisés.



**Figure 19.** Evolution spatiotemporelle de la variance expliquée par la CP1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d’une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

La figure 19 présente l’évolution de la variance expliquée par la CP1, exprimant la variance commune de la croissance entre les arbres sondés due au climat.

La variance expliquée par la CP1 varie entre 24,09 % et 77,40 %. Plusieurs pics ont été enregistrés : ils coïncident avec la formation de cernes minces, traduisant des périodes de sécheresses récurrentes. C’est le cas des périodes calculées sur les moyennes mobiles des périodes 1763-1772, 1774-1788, 1859-1878, 1889-1927, 1943-1952, 1954-1966 et à partir de la fin de la décennie 1970, à partir de laquelle les valeurs sont en augmentation continue. Des résultats comparables ont été signalés par Slimani (2014) pour les régions de Kabylie et des Aurès. Les valeurs faibles de la variance commune de la croissance entre les arbres sondés correspondent aux périodes marquées par la formation de cernes épais. Ceci veut dire que les arbres ont tendance à avoir une réponse commune que quand les conditions climatiques sont limitantes à la croissance. Au contraire, lors des périodes humides (conditions favorables), les conditions spécifiques à l’emplacement de chaque arbre s’expriment (exposition, profondeur du sol, pente, etc.) ce qui fait diminuer la réponse commune de l’ensemble des arbres sondés.

Sur les périodes ayant enregistré un pic de la CP1, trois sont particulièrement rapportées comme ayant été marquées par des sécheresses sévères en Afrique du Nord (Touchan, 2008, 2010 ; Kherchouche, 2012, 2013 ; Slimani, 2014). Il s’agit des périodes s’étalant entre la fin des années 1870 et début des années 1880, la fin des années 1970 et début des années 1980 et, enfin, la période couvrant la fin du XX<sup>e</sup> siècle et le début du XXI<sup>e</sup> siècle. C’est au cours de cette dernière période qu’a été enregistrée la sécheresse la plus

sévère en Afrique du Nord depuis au moins les cinq derniers siècles (Touchan *et al.*, 2010). Ces trois pics ont coïncidés avec des périodes de dépérissement du cèdre de l'Atlas en Algérie (Lapie, 1909 ; Abdessemed, 1981, Kherchouche, 2012, 2013 ; Slimani, 2014).

### 3. Relation cerne-climat

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

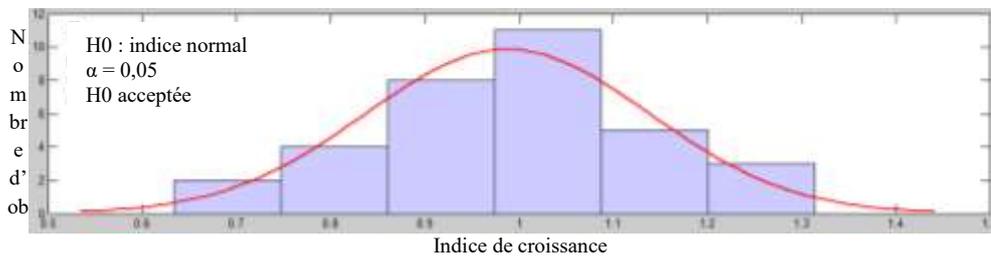


Figure 20. Fonction normale de densité de probabilité ajustée : histogramme de l'indice de croissance et test de normalité de Lilliefors (Conover, 1980 *in* Meko *et al.*, 2011).

Les résultats des fonctions de réponses effectuées sous le programme Seascorr, impliquant l'indice de croissance et 24 régresseurs climatiques mensuels (12 valeurs pour les données de précipitations et 12 valeurs pour les températures moyennes), sont illustrés sur les figures 21 et 22 ainsi que dans le tableau 4.

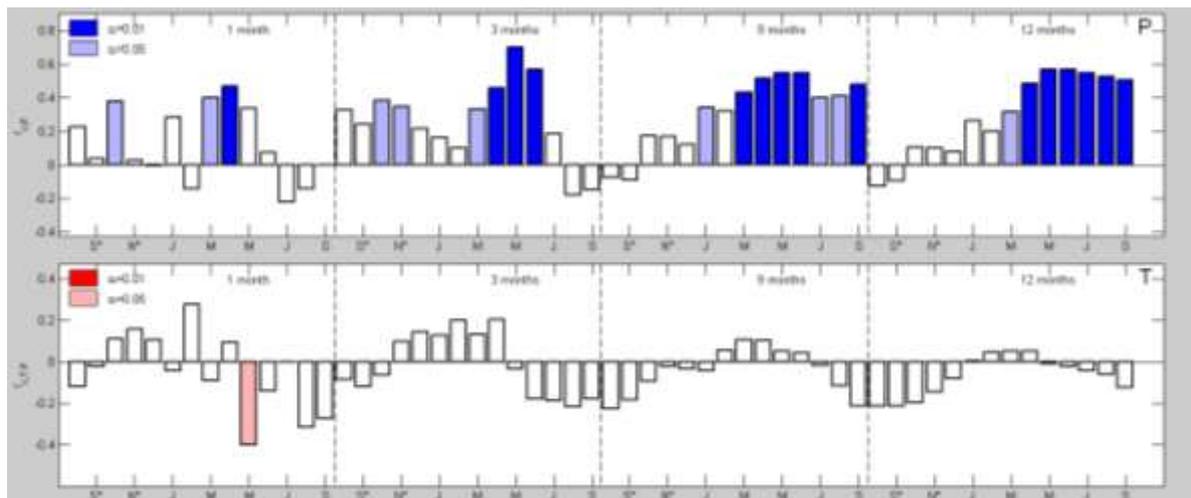


Figure 21. Corrélations entre l'indice de croissance et les variables climatiques saisonnières. En haut les corrélations avec la variable climatique primaire, les précipitations

### III. Résultats et Discussions

(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 21 affiche des corrélations positives et significatives entre les précipitations et l'indice de croissance pour les mois d'octobre de l'année t-1 ( $\alpha = 0,05$ ,  $n = 33$ ), et de mars ( $\alpha = 0,05$ ,  $n = 33$ ) et avril ( $\alpha = 0,01$ ,  $n = 33$ ) de l'année t. Les corrélations obtenues pour les mois de janvier et de mai sont aussi positives et très appréciables. Les corrélations enregistrées au cours des mois de novembre et décembre de l'année t-1, ainsi que celles des mois de février, juin, juillet et août de l'année t sont soit faible et/ou négatives. Ceci est dû au fait que les précipitations de ces mois, prises individuellement, n'ont pas un effet direct sur la croissance radiale, car elles ont lieu en dehors de la saison de croissance. Touchan *et al.* (2017) a aussi noté des corrélations négatives entre les précipitations hivernales et la croissance radiale pour quelques cédraines algériennes. Le cas de la faible corrélation enregistrée de la fin de l'automne à la moitié de l'hiver, malgré l'abondance des précipitations en cette période de l'année, peut être dû à plusieurs facteurs. Les basses températures, notamment pendant les périodes d'enneigement, peuvent réduire directement l'absorption de l'eau en réduisant la perméabilité des racines et indirectement en augmentant la viscosité de l'eau (Kozłowski, 1987; Suvanto, 2014). Ces réponses aux températures basses est souvent identique à celle induite par le déficit hydrique du sol (Benzioni et Dunstone, 1988; Vernieri *et al.*, 1991), dont l'effet est exprimé sur les corrélations des mois de juin à septembre (Fig. 21), réputée comme période sèche en région méditerranéenne.

Par ailleurs, les figures 21 et 22 et le tableau 4 révèlent que la corrélation est meilleure en considérant les précipitations moyennes sur des périodes de plus d'un mois. Ceci oppose l'effet cumulé des précipitations à l'effet immédiat des températures dont seul le mois de mai affiche une corrélation significative ( $\alpha = 0,05$ ,  $n = 33$ ).

La figure 22 montre une relation plus ou moins linéaire entre les précipitations et la croissance radiale. Ceci est d'autant plus prononcé en considérant des périodes de plus en plus longues pour lesquelles les illustrations affichent très peu de valeurs extrêmes (observations aberrantes). En considérant les mois individuellement, le mois d'avril affiche la corrélation la plus forte ( $r = 0,47$ ). La meilleure corrélation est obtenue en composant avec les saisons : c'est le printemps (période de 3 mois se terminant par mai) qui enregistre la corrélation la plus élevée ( $r = 0,70$ ). Pour la période de 9 mois et d'une année, les meilleures périodes se terminent avec le mois juin, avec des coefficients de corrélation de 0,55 et 0,57 respectivement.

### III. Résultats et Discussions

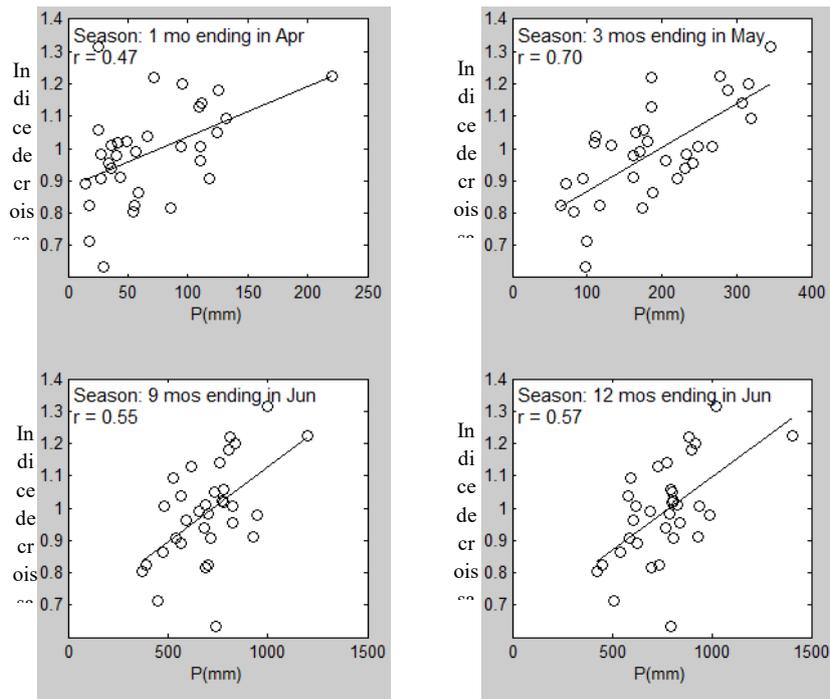


Figure 22. Diagrammes de dispersions entre les précipitations (P) et l'indice de croissance. Les meilleures corrélations sont illustrées pour les périodes d'un mois, de 3, de 9 et de 12 mois.

**Tableau 4.** Stabilité temporelle de la corrélation entre les précipitations et l'indice de croissance.

Période (mois)	Corrélations <sup>a</sup>			Taille de l'échantillon <sup>b</sup>		Résultat du test <sup>c</sup>	
	Totale	1 <sup>re</sup> sous-période	2 <sup>e</sup> sous-période	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	$\Delta Z$	P
Avril	0,47	0,21	0,70	17	16	-0,648	0,092
Mars-Mai	0,70	0,57	0,75	17	16	-0,336	0,382
Octobre*-Juin	0,55	0,46	0,58	17	16	-0,167	0,665
Juillet*-Juin	0,57	0,51	0,60	17	16	-0,128	0,740

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

<sup>a</sup>: Les corrélations linéaires de Pearson sont calculées pour la période totale (1975-2007), la première sous-période (1975-1991) et la deuxième sous-période (1992-2007).

<sup>b</sup>: N<sub>1</sub> et N<sub>2</sub> sont le nombre d'années pour chaque sous-période.

<sup>c</sup>:  $\Delta Z$  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

### III. Résultats et Discussions

population. Une différence significative entre les corrélations des deux sous périodes est indiquée par une faible valeur p (ex.  $p < 0,05$ ).

Le tableau 4 montre que les corrélations entre les précipitations mensuelles et l'indice de croissance sont positives et significatives pour la période totale et pour les deux sous-périodes considérées. Aucune différence significative n'a été décelée entre les deux sous-périodes d'analyse. Ceci justifie que la relation cerne-précipitation est stable dans le temps. En considérant les mois individuellement, la précipitation d'avril est celle qui a le plus d'influence sur la croissance radiale. En se référant à des saisons, c'est, comme attendu, la précipitation printanière qui a le plus de contrôle sur la croissance des arbres. C'est d'ailleurs la période qui enregistre les coefficients de corrélation les plus forts. La période de 9 mois allant d'octobre de l'année t-1 à juin de l'année t affiche aussi une relation significative et temporellement stable appréciable. Plusieurs études se sont basées sur cette période pour la reconstruction des précipitations en Afrique du Nord (Touchanet *al*, 2008, 2010, 2016 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014)

A cet effet, le tableau 4 révèle qu'il est aussi tout à fait possible d'utiliser la période de 12 mois allant de juillet de l'année t-1 à juin de l'année t pour la reconstruction des précipitations. Toutefois, par mesure de prudence aucun auteur n'a utilisé une période d'une année pour la reconstitution climatique au niveau du Bassin méditerranéen.

# CONCLUSION

## Conclusion

Le présent travail traite de la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique au niveau du mont Takoucht, situé dans la partie occidentale de la chaîne des Babors. Il s'agit, à notre connaissance, de la première étude proposant une analyse climatique à long terme et reposant sur une approche dendrochronologique dans la Kabylie des Babors.

Quelques problèmes de datation ont été notés, notamment à cause de la perturbation continue que présente l'effet combiné du pâturage et des incendies fréquents, provoqués justement régulièrement pour renouveler ce dernier. Néanmoins, une chronologie multicentenaire a été établie pour le site d'étude. Les résultats mettent en évidence la sensibilité des arbres sondés à la variabilité climatique passée et actuelle, exprimée par une forte variabilité de la croissance observée sur l'ensemble de la période de la période d'analyse considérée.

L'analyse des tendances d'évolution de la sensibilité moyenne des arbres, de l'indice de croissance de la chronologie maîtresse résiduelle, des fréquences relatives en cernes épais et minces et de la variance commune de la croissance entre les arbres met en exergue une augmentation de la sensibilité de la cédraie de Takoucht vis-à-vis de la variabilité climatique enregistrée au cours des dernières décennies. Ceci est notamment exprimé par l'augmentation de la fréquence en cernes diagnostiques, notamment en cernes très minces, résultats d'épisodes récurrents de sécheresse ayant caractérisé cette période. Aussi, les résultats révèlent une forte synchronisation entre les patrons individuels de croissance lors des périodes sèches. Ceci montre que les arbres ont tendance à avoir une croissance, donc une réponse, de plus en plus commune quand les conditions sont de plus en plus limitantes. Cette tendance à l'augmentation de la réponse commune des arbres à des conditions plus ou moins homogènes aux échelles méso- et macro-climatique est accompagnée par une atténuation, voire la disparition dans certains endroits, de l'effet des conditions microclimatiques imposées par certaines conditions de site et de peuplement (altitude, exposition, pente, profondeur du sol, etc.), qui sont parfois indispensables pour le maintien du cèdre de l'Atlas.

Les résultats de la relation cerne-climat montrent le rôle principal qu'ont les précipitations dans le contrôle de la croissance au niveau de la cédraie d'étude. L'effet de ces dernières est d'autant plus exprimé quand elles sont considérées sur des périodes de plus en plus longues. Le printemps présente évidemment la saison dont les pluies sont les plus efficaces. Néanmoins, l'analyse des corrélations saisonnières justifie bien la possibilité d'une reconstitution dendrochronologique des précipitations pour la période de 9 mois allant d'octobre de l'année t-1 à juin de l'année t, voire sur la période complète d'une année allant de juillet de l'année t-1 à juin de l'année t.

En perspective, il est souhaitable d'étaler cette étude à l'ensemble des Babors en impliquant plusieurs essences faisant patrie de notre patrimoine forestier, à l'image du chêne zéen, du chêne afarès et du sapin de Numidie. Il serait alors très intéressant de se pencher, entre autres, sur une tentative de reconstitution des précipitations pour cette région, connue comme étant la plus pluvieuse du pays.

# Références bibliographiques

- Abdelhamid, D., Marniche, F., Allal-Benfekith, L., Benadjroud, N., Mouna, M., 2017. Importance des Coléoptères sylvatiques associées au cèdre de l'Atlas au parc national de Theniet El Had (Algérie). *Revue Agrobiologia* x(x) : 297-311 p.
- 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 de Doc. Ing. Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille. 201 p.
- Abdessemed, K., 1982. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif de l'Aurès et du Belezma. Etude phytosociologique. Problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse Doc. Ing. Fac. Des sciences et techniques, St Jérôme Aix Marseille, 200 p.
- Abourouh, M., Morelet, M., 1999. Les champignons parasites du cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord et en France. *For. Med.* t. XX, n°4. 192-202.
- Addar, A., 2012. Changement climatique. Dépérissement du cèdre en Algérie et actions sylvicoles. 17<sup>ème</sup> Colloque international en évaluation environnementale, du 12 au 15 juin pour une gestion durable des ressources minières, énergétiques et biologique. Montréal.
- Aidrous-Larbi, N., 2007. Exploration de la variabilité géographique des cèdres méditerranéens, *Cedrus atlantica*, *Cedrus libani* et *Cedrus brevifolia*. Thèse de Magister de l'Institut National d'Agronomie d'Alger.
- Alileche, A., 2012. Etude du dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans la cédraie des Aurès : Bélezma (Batna) et Chélia (Khenchela). Magister Thesis. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger.
- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660-684.
- Andreu, L., Gutiérrez, E., Macia M., Ribas, M., Bosch, O., Camarero, J.J., 2007. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology* 13, 1–12, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01322.x.
- Arbez, M., Fernandez, P., Uyar, N., 1978. Contribution à l'étude de la variabilité géographique des cèdres. *Ann. Sci. Forest.* 35(4) : 265-284.
- Aussenac, G., 1984. Le Cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysiological. Colloque de Bioclimatologie Méditerranéenne, Montpellier, 18- 20 mai 1983. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 131, Actual. Bot. 2/3/4/: 385-398.
- Bachtobji-Bouachir, B., Khorchani, A., Guibal, F., El Aouni, M.H., Khaldi, A., 2017. Dendroecological study of *Pinus halepensis* and *Pinus pinea* in northeast coastal dunes

- in Tunisia according to distance from the shoreline and dieback intensity. PII: S1125-7865(17)30026-7, Ref. Dendro 25458.
- Benabid, A., 1982. Etude phytocéologique, biologique et dynamique des associations et séries sylvatiques du rif occidental, thèse Doct. 165 p.
- Benabid, A., 1994. Biogéographie, phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). Ann. Rech. For. Maroc. T 27. 61-76 pp.
- Bentouati, A., 2008. La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). Forêt Méditerranéenne, t. XXIX, (2) : 203-208.
- Bentouati, A., Oudjehih, B., 1999. Première étude de la croissance et de la productivité du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans le massif du Belezma (Aurès-Algérie). Forêt Méditerranéenne t. XX, n° 2. pp. 115-119.
- Benzioni, A., Dunstone, R.L., 1988. Effect of air and soil temperature on water balance of jojoba growing under controlled conditions. *Physiologia Plantarum* 74 (1): 107-112.
- Biltekin, D., Popescu, S.M., Suc, J.P., Quézel, P., Jiménez-Moreno, G., Yavuz, N., 2015. Anatolia: a long-time plant refuge area documented by pollen records over the last 23million years. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 215, 1–22. doi: 10.1016/j.revpalbo.2014.12.004
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Schneuwly, D.M., Bourqui, K., 2008. Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology* 28: 255–263.
- Bou Dagher-Kharrat, M., Mariette, S., Lefèvre, F., Fady, B., Savouré, A., 2007. Geographical diversity and genetic relationships among *Cedrus* species estimated by AFLP. *Tree Genet. Genomes* 3, 275–285. doi: 10.1007/s11295-006-0065-x
- Boudy, P., 1952. Guide du forestier en Afrique du Nord. Edition la Maison Rustique, Paris, 505 p.
- Boudy, P., 1955. Economie forestière nord-africaine. Tome IV, Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Ed. Larose, Paris 483 p.
- Candau, J.N., 2008. Impacts du changement climatique sur les insectes ravageurs des forêts méditerranéennes par Jean-Noël forêt méditerranéenne t. XXIX, n° 2, pp. 145-154.
- Cook, E.R., 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. Ph.. D. thesis. University of Arizona. Tucson. 171 p.
- Cook, E.R., Briffa, K.R., Shigatov, S., Mazepa, V., Jones, P.D. 1990. Data analysis. Pages 98-162 in *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, édité par Cook ER, Kairiukstis LA. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.

- Cook, E.R., Briffa, K.R., Shiyatov, S., Mazepa, V., 1990. Tree-ring standardization and growth-trend estimation. Pages 104-122 in Cook, E., and Kairiukstis, L.A., *Methods of Dendrochronology*, 1st edn. Kluwer Academic.
- Cook, E.R., Holmes, R.L. 1999. *Program ARSTAN User's Manual*. Tucson, AZ: Laboratory of Tree-Ring Research. The University of Arizona, Tucson. 81 p.
- Davi, H., 2015. Impact des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers de la région méditerranéenne *Innovations Agronomiques* 47 (2015), 1-16.
- Delwaide, A., Fillion, L., 2010. Echantillonnage et datation dendrochronologiques. Pages 167-197 in Payette, S. et Fillion, L., *La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Derridj, A., 1990. Étude des populations de *Cedrus atlantica* Manetti en Algérie. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse. 288p.
- Douglass, A.E., 1939. Crossdating in dendrochronology, *J. Forest.*, 39: 825-831.
- Douglass, A.E., 1946. Precision of ring dating in tree-ring chronologies. *University of Arizona Bulletin* 17(3): 1-21.
- Dupérat, M., Polese, J.M., 2008., *Encyclopédie visuelle des arbres & arbustes*. Editions Artemis. 239 p.
- Duplan, L., 1952. La région de Bougie. Publ. XIXe Congr. Geol. Int. Monog. Région 1er Série Algérie. 195 ; 17.
- El Abidine, A.Z., 2003. Forest decline in Morocco: causes and control strategy. *Science et changements planétaires. Sécheresse* 14, 209-218.
- 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. n° 198* Fev. Tome XVII, pp. 77- 91.
- Esper, J., Frank, D., Buntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J., Xoplaki, E., 2007. Long-term drought severity variations in Morocco. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 34, L17702, doi: 10. 1029/2007GL030844.
- Fabre, J.P., 1976. Extension du cèdre et risques d'attaques d'insectes. *Revue Forestière Française*. 28(4) : pp.261-269.
- Feddi, N., Fauquette, S., Suc, J.P., 2011. Histoire pliopléistocène des écosystèmes végétaux de Méditerranée sud-occidentale : apport de l'analyse pollinique de deux sondages en mer d'Alboran. *Geobios* 44, 57–69. doi: 10.1016/j.geobios.2010.03.007.
- Ferreira, T., Rasband, W., 2012. *ImageJ user guide*. Revised edition IJ 1.46r. 185p. <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>

- Fritts, H.C., 1976. Tree rings and climate. London, New York, San Francisco, Academic Press, 567 p.
- Fritts, H.C., 1976. Tree-rings and climate. Academic Press. New York. 567 pages.
- Garah, K., Bentouati, A., Sánchez-Salguero, R., 2016. Growth response of *Pinus halepensis* Mill plantations to climatic variables in Aurès mountains, Algeria, in Hevia, A., Sánchez-Salguero, R., Linares, J. C., Olano, J. M., Camarero, J. J., Gutiérrez, E., Helle, G., Gärtner, H. (2016), TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Volume 14. Scientific Technical Report 16/04, GFZ German Research Centre for Geosciences.
- Gharzouli, R., 2007. Flore et végétation de la Kabylie des Babors: étude floristique et phytosociologiques des groupements forestiers et post-forestiers des djebels Takoucht, Adrar Ou-Mellal, Tababort et Babor. Thèse de Doctorat, Univ., Sétif, 253 p.
- Hoerling, M., Kumar, A., 2003. The Perfect Ocean for Drought. Science, 299, 691-694. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1079053>.
- Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-ring Bulletin 43 : 69-78.
- Ilmen, R., 2014. Growth dynamics and potential for multi-century climate reconstruction of *Cedrus atlantica* M. In Morocco. Journal of Ecology Environment & Biology 2014;2(1):97-103.
- Ilmen, R., Sabir, A., Benzyane, M. et Hachmi, M., 2013. Tree ring growth of *Cedrus atlantica* Manetti under climate conditions throughout Moroccan Middle Atlas mountains. Sci. For., Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 377-388, set. 2013.
- IPCC, 2014. "Climate change 2014: synthesis report," in Contribution of Working Groups, I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds Pachauri, R.K., Meyer, L.A., and Core Writing Team (Geneva: IPCC), 151.
- Kherchouche, D., Kalla, M., Gutierrez, E., Briki, A., Hamchi, A. 2013. La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). Sécheresse 24 (2), 129-37.
- Kherchouche, D., Kalla, M., Gutiérrez, E.M., 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., Gutiérrez, E.M., Attalah, S., Bouzghaia, M. 2012. Impact of droughts on *Cedrusatlantica* forests dieback in the Aurès (Algeria). J. Life Sci. 6 : 1262-1269.

- Kherchouche, D., Kalla, M., Gutiérrez, E.M., Briki, A., Hamchi, A. 2013. La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Sécheresse* 24 (2) : 129-37.
- Kozłowski, T.T., 1987. Soil moisture and absorption of water by tree roots. *Journal of Arboriculture* 13 (2), 39-46.
- Krouchi, F., 2010. Etude 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. Doctorat. U.M.M.T.O..
- Lanier, L., 1994. Les champignons des cédraies en Algérie (étude comparative). *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, 27 (2) : 553-563.
- Lapie, G., 1909. *Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurdjura*. Thèse de Doctorat. Université de Paris. 156 p.
- Lebourgeois, F., Mérian P. 2011. La sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XXe siècle ? *Rev. For. Fr.* LXIII - 1-.
- Lebourgeois, F., Merian, P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. *Agro. Paris Tech.*, ENGREF 85 p.
- Lebourgeois, F., Mérian, P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. *LerfobInra-Engref*, 88 p.
- Legay, M., 2014. Effets attendus du changement climatique sur l'arbre. *in* L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, Chap. : B, Publisher : La Documentation Française, Editors : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, pp.33-64
- Lepoutre, B., 1961. Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines. *Ann. Rech. For. Maroc*, 6: 1-211.
- Lepoutre, B., 1964. Premier essai de synthèse sur le mécanisme de régénération du cèdre dans le Moyen-Atlas marocain. *Ann. Rech. For. Maroc* 7, 57-163.
- Lepoutre, B., 1964. Suite d'observations sur la régénération du cèdre par taches. *Ann. Rech. For. Maroc. T (7)* : pp.1-20.
- Lepoutre, B., Pujos, A., 1964. Facteurs climatiques déterminants les conditions de germination et installation des plantules de cèdre. *Ann.Rech.For. Maroc .T7.* 21-54.
- Linares, J.C., Taïqui, L., Camarero, J.L. 2011. Increasing drought sensitivity and decline of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests, *Forests* 2 (3), 777-796, doi: 10.3390/f2030777.

- Linares, J.C., Taïqui, L., Camarero, J.L., 2011. Increasing drought sensitivity and decline of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas Forests, *Forests* 2(3): 777-796.
- 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. 499 p.
- 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*, T (27). Pp : 3-21.
- M'Hirit, O., 1999. Le cèdre de l'Atlas bilan et perspectives. *For. Méd.*, 20: 91-100.
- M'Hirit, O., Benzyane, M., Blérot, P., 2006. Le cèdre de l'Atlas : Mémoire du temps. Mardaga. 280p.
- M'Hirit, O., Et-Tobi, M., 2010. Les écosystèmes forestiers face au changement climatique : situation et perspectives d'adaptation au Maroc. Programme d'études « Changement climatique : impacts sur le Maroc et options d'adaptation globales. Ires.260p.
- Magri, D., 2012. Quaternary history of *Cedrus* in southern Europe. *Ann. Di Bot.* 2, 57–66. doi: 10.4462/annbotrm-10022
- Médail, F., Quézel, P., 1997. *Hot-spots* analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 84 :112-127.
- Meddour, R., 1994. La cédraie de l'Atlas blidéen (Algérie) : valeurs bioclimatique, syntaxonomique et dynamique. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27: 105-127.
- Meddour, R., 2010. Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie. Exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie. Thèse. Doct. Agr. Option. Foresterie. Ummto, 398p.
- Meko, D.M., Touchan, R., Anchukaitis, K.J., 2011. Seascorr: a MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Comput. Geosciences* 37 (9), 1234-1241.
- Meko, D.M., Touchan, R., Anchukaitis, K.J., 2011. Seascorr: A MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Computers & Geosciences* 37, 1234-124.
- Messaoudene, M., 2013. Etat des lieux et perspectives des cédraies algériennes. [http://iii-med.forestweek.org/sites/default/files/press/02\\_messaoudene.pdf](http://iii-med.forestweek.org/sites/default/files/press/02_messaoudene.pdf).
- Mouna, M., Avcıb, M., 2016. Cedar forests under threat of new pests. *Turkish Journal of Forestry*. 1: pp. 71-75.

- Nedjahi, A., 1988. La cédraie de Chréaa (Atlas blidéen) phénologie, Productivité Régénération. Thèse. Doct. 3ème cycle. Univ. NANCY I : 184
- Neffati, M., Najjaa, H., Máthé, Á., 2017. Medicinal and aromatic plants of the world. Africa. Springer, 2017 - 411 pages
- Nicault, A., Bégin, Y., Guiolt, J., 2010. Standardisation des séries dendrochronologiques. Pages 199-227 in Payette, S. et Filion, L., La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications. Presses de l'Université Laval, Québec
- Nicault, A., Bégin, Y., Guiot, J. 2010. Standardisation des séries dendrochronologiques. Pages 199-228 in S. Payette et L. Filion. La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications. Presses de l'Université Laval, Québec.
- Philippe, G., 2006. Partiel : du méristème à la graine. In: J. Baudel (ed.). Reproduction sexuée des conifères et production des semences en verger à graines. Collection Synthèses, Cemagref.
- Philippe, G., Baldet, P., Héois, B., Ginisty, C., 2006. Reproduction sexuée des conifères et production de semences en vergers à graines. Editions Quae, 570 pages.
- Putod, R., 1979. Le cèdre de l'Atlas en France. Bull. de vulgarisation For. Août- Sept : pp. 1-75.
- Qiao, C.Y., Ran, J.H., Li, Y., and Wang, X.Q., 2007. Phylogeny and biogeography of *Cedrus* (Pinaceae) inferred from sequences of seven paternal chloroplast and maternal mitochondrial DNA regions. Ann. Bot. 100, 573–580. doi: 10.1093/aob/mcm134
- Quézel, P., 1976. Les forêts du pourtour méditerranéen. Forêts et maquis méditerranéens. Ecologie, conservation et aménagement. Note technique du M.A.B. n°2, UNESCO, p.14-32.
- Quézel, P., 1980. Biogéographie et écologie des conifères sur le pourtour méditerranéen. In. Person. Actualité d'écologie forestière. Ed. Bordas, Paris., 205-256.
- Quézel, P., 1998. Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : signification bioclimatique et phytogéographique. – Forêt méditerranéenne XIX (3): 243- 260.
- Rhanem, M., 2010. Esquisse d'une typologie géomorphologique de quelques cédraies à *Cedrus atlantica* Man. Dans le Haut Atlas oriental de Midelt (Maroc). Menaces et perspectives de conservation, de gestion et de restauration. *Quad. Bot. Amb. Appl.*, vol. 21, p. 141-159.
- Rhanem, M., 2011. Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc), *Physio-Géo*, Volume 5 (1), 143-165.

- Rhanem, M., 2013. La topoclimatologie, un outil au service de l'écologie. Applications et implications possibles au niveau de la gestion des forêts d'altitude des montagnes du Moyen et Haut Atlas (Maroc). *Quad. Bot. Amb. Appl.*, 24 (2013): 77-107.
- Sarmoum, M., 2008. Impact du climat sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas ( *Cedrus atlantica* Manetti). Diagnostique dendrochronologique et climatique de la cédraie de Theniet El Had (Wilayaa de Tissemsilt). Mémoire de Magister. Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, Alger. 98p.
- Seltzer, P., 1946. Le climat d'Algérie. Univ d'Alger. Institut de Météorologie et de Physique du Globe. 219p.
- Slimani S, Derridj A, Gutiérrez E. 2014. Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria). *Forest Systems* 23 (3): 448-460.
- 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 de doctorat en science. Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou. 171p.
- Stokes, M.A., Smiley, T.L., 1996. An Introduction to Tree-ring Dating. The University of Arizona, Tucson Press, Tucson, Arizona. 73 p.
- Suvanto, S., 2014. Phloem transport and drought. *Journal of Experimental Botany* 65, 1151-1759.
- Thompson, J.D., 2005. Plant evolution in the Mediterranean. Oxford University Press: p. 293.
- Toth, J., 1970. Plus que de centenaire et plein d'avenir : Le cèdre en France R.F.F. Vol. XXII, n° 3: 355-364
- Toth, J., 1980. Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière. *Forêt méditerranéenne* II(1): 23-30.
- Toth, J., 2005. Le cèdre de France : étude approfondie de l'espèce. Éditions l'Harmattan, Paris
- 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. doi:10.1029/2008GL034264.
- Touchan, R., Anchukaitis, K.J., Meko, D.M., Kerchouche, D., Slimani, S., Ilmen, R., Hasnaoui, F., Guibal, F., Camarero, J.J., Sánchez-Salguero, R., Piermattei, A., Sesbou, A., Cook, B.I., Sabir, M., Touchan, H., 2017. Climate controls on tree growth in the Western Mediterranean. *The Holocene* 1-14. <https://doi.org/10.1177/0959683617693>
- Touchan, R., Anchukaitis, K.J., Meko, D.M., Kerchouche, D., Slimani, S., Ilmen, R., Hasnaoui, F., Guibal, F., Camarero, j.j., Sánchez-Salguero, R., Piermattei, A., Sesbou, A., Cook, B.,

- Sabir, M., Touchane, H., 2017. Climate controls on tree growth in the Western Mediterranean. *journals.sagepub.com/home/hol*. DOI: 10.1177/0959683617693901.
- 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.*, doi: 10.1007/S0038260106080464.
- 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.*, doi: 10.1007/S0038260106080464.
- 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.*, doi: 10.1007/S0038260106080464.
- Touchan, R., Kherchouche, D., Oudjehih, B., Touchan, H., Slimani, S., Meko, D.M., 2016. Dendroclimatology and wheat production in Algeria. *Journal of Arid Environments* 124, 102-110.
- Vernieri, P., Pardossi, A., Tognoni, F., 1991. Influence of chilling and drought on water relations and abscisic acid accumulation in bean. *Australian Journal of Plant Physiology* 18: 25–35.
- Wigley, T.M., Jones, P.D., Briffa, K., 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Clim. Appl. Met.* 23, 201–213.
- Yahi, N., 2007. Les cédraies d'Algérie : phytoécologie, phytosociologie, dynamique et conservation des peuplements. Thèse .Doct. Univ .USTHB 265p.
- Yahi, N., Djellouli, Y., 2010. Groupements forestiers et préforestiers à *Cedrus atlantica* Manetti d'Algérie : état des connaissances et dynamique des syntaxons. Session 2 - Les travaux de synthèse. *Rev. For. Fr.* LXII - 3-4. pp.309-316.
- Yamaguchi, D.K., Brunstein, F.C., 1991. Special sanding films and sandpapers for surfacing narrow-ring increment cores. *Tree Ring Bulletin* 51, 43-46.
- Zaremski, A., Bakkali-Yakhlef, S., Chaintreuil, C., Abbas, Y., Prin, Y., Abourouh, M., Ducouso, M., Baudassé, C., 2007. Caractérisation moléculaire du M'jej, agent de dépérissement des cédraies marocaines. *Bois et forêt des tropiques*, N° 291 (1). 67-73.

**Annexe 1 : Données climatiques de la station de Bejaia.**

**Tableau I : Valeurs mensuelles des températures maximales (M °C) de la station de Bejaia (1978 - 2016).**

	JAN	FEV	MA R	AVR	MAI	JUI	JUL	AUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1973	14,9	14,2	14,9	18,7	22,4	24,8	28	28,7	28,1	22,9	19,5	17,6
1974	16,6	15,9	17,8	17,5	22,5	24,8	27,1	28,4	28,4	21,3	20,7	15,7
1975	16,5	16,2	17,2	18	20,5	24	28,8	29,6	27,9	24	18,9	16,6
1976	15	15,3	17,1	18,5	21,4	24,9	27,7	28,4	27,6	22,9	17,3	18,2
1977	16,7	19,2	20,1	20,4	21,9	25	26,3	27	25,9	27	20,6	18,8
1978	15,20	18,90	18,10	18,30	21,70	25,00	29,10	28,60	26,90	22,00	18,70	20,10
1979	18,80	18,20	18,30	18,30	21,70	25,80	28,70	28,80	25,60	24,30	17,90	17,60
1980	16,60	17,10	18,20	17,70	21,70	25,00	27,30	30,00	27,90	24,00	20,80	14,10
1981	14,50	15,70	19,10	19,90	23,30	24,70	26,30	27,70	27,90	26,10	20,20	19,60
1982	17,30	15,80	18,00	19,00	21,50	27,70	32,90	28,80	27,30	24,00	19,60	15,00
1983	16,20	15,90	18,30	21,50	23,70	26,70	32,90	28,40	29,30	25,20	22,20	17,50
1984	16,40	15,20	17,10	24,70	21,40	25,10	30,60	28,10	28,00	22,70	22,40	16,00
1985	14,50	19,50	16,40	20,50	21,50	25,70	29,40	29,00	27,10	25,30	21,90	18,00
1986	16,10	17,10	17,10	20,20	24,00	25,50	28,90	30,70	28,30	25,00	19,70	16,20
1987	16,10	16,80	17,50	20,90	21,40	25,90	28,90	31,90	31,10	27,90	20,60	19,10
1988	18,70	16,90	18,80	20,20	22,60	26,00	29,30	31,10	26,80	27,30	20,10	15,20
1989	15,60	17,60	19,20	20,30	21,90	26,00	29,80	30,70	28,80	24,40	21,80	21,50
1990	16,00	19,70	19,30	18,90	22,10	26,40	28,60	28,90	29,80	26,60	20,10	14,60
1991	15,40	15,00	19,90	17,80	20,80	25,70	28,70	30,50	29,10	22,20	19,80	15,80
1992	15,20	16,50	17,10	19,30	22,00	25,00	27,50	29,90	28,60	24,70	21,10	17,60
1993	16,10	14,90	17,50	19,80	23,50	26,20	29,30	29,70	26,80	24,70	18,90	17,50
1994	16,30	18,10	19,00	19,20	24,50	25,90	30,20	33,50	29,10	24,80	21,90	17,60
1995	16,20	19,50	18,40	19,90	24,70	24,90	28,70	30,30	27,30	25,70	22,20	20,00
1996	18,90	15,90	18,80	20,00	22,40	25,70	28,60	29,10	26,40	23,30	21,60	19,20
1997	18,00	17,90	18,70	20,40	24,10	28,30	28,10	30,20	28,10	25,10	21,10	18,30
1998	17,40	18,10	19,00	21,10	21,80	27,50	28,40	29,40	28,50	23,80	19,10	16,20
1999	15,90	14,70	19,20	20,20	25,00	26,90	29,00	31,50	29,30	27,80	19,00	16,60
2000	15,10	17,90	19,10	22,60	23,20	25,50	30,20	31,90	28,20	24,30	22,10	19,90
2001	18,30	17,50	23,10	20,50	21,80	27,70	29,40	30,30	27,30	28,80	20,20	16,30
2002	16,50	17,20	19,40	20,70	23,30	26,40	28,00	28,80	27,90	25,70	21,50	18,80
2003	15,60	14,80	18,80	19,60	21,90	30,00	33,00	33,30	28,30	25,10	21,40	16,30
2004	16,90	18,30	18,00	19,90	21,50	25,70	29,50	31,80	29,10	28,30	19,20	16,90
2005	13,90	13,60	17,30	20,30	24,30	27,60	29,90	29,80	28,00	26,10	20,50	16,50
2006	15,10	16,30	20,30	22,90	24,30	27,60	30,30	29,80	28,80	27,80	23,80	18,00
2007	18,60	19,60	18,40	20,20	24,80	26,40	29,10	31,10	27,40	24,10	19,70	16,10
2008	18,00	19,00	19,00	22,00	23,00	26,00	30,00	30,00	27,00	25,00	20,00	17,00
2009	16,00	16,00	18,00	20,00	25,00	28,00	32,00	31,00	28,00	25,00	23,00	20,00
2010	17,00	19,00	19,00	21,00	23,00	26,00	30,00	30,00	28,00	25,00	20,00	19,00
2011	16,90	16,30	19,10	21,60	23,60	25,60	30,40	30,70	29,50	25,80	21,60	17,90
2012	17,00	12,90	18,50	21,70	23,90	29,30	30,60	32,90	28,30	26,30	22,70	18,80
2013	17,40	15,50	20,90	20,60	22,40	25,40	29,50	29,30	27,40	27,90	19,60	18,10
2014	18,80	19,40	17,50	22,60	23,10	27,10	28,80	30,40	30,80	27,10	23,70	17,70
2015	16,70	15,40	18,60	21,30	25,20	27,20	31,20	31,40	29,20	26,10	21,10	19,90
2016	19,40	19,90	18,30	20,70	23,30	26,50	29,50					

**Tableau II.** Valeurs mensuelles des températures minimales (m °C) de la station de Bejaia (1978 -2016).

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC
1973	7,8	7,1	6,6	9,2	13,9	18,4	19,7	20,2	18	22,9	9,3	7,7
1974	8,2	8,1	8,3	9,4	13,1	16,8	18,4	18,9	18,8	21,3	10,3	7,1
1975	7,3	7,4	7,9	9,1	12,4	15,2	19,1	20,4	19,6	24	10,5	8,5
1976	6,9	8,3	7,7	9,9	13,3	16,1	19,4	19	17,6	22,9	9,3	9,6
1977	9,3	8,9	9,3	10,1	12,9	15,6	19	18,4	16,4	27	11,4	9,2
1978	5,90	9,30	8,40	9,90	12,10	16,00	18,10	19,50	16,70	22,00	8,90	9,90
1979	10,00	9,30	8,20	8,20	12,60	18,00	19,20	20,00	17,70	24,30	8,80	7,40
1980	6,70	7,80	8,30	8,80	12,30	16,00	17,50	20,00	18,60	24,00	11,70	6,10
1981	5,90	7,30	10,30	10,70	13,30	17,00	17,50	19,10	18,30	26,10	10,10	10,00
1982	8,20	7,50	8,20	10,10	14,60	18,00	21,20	20,90	18,60	24,00	11,90	7,50
1983	5,00	5,90	9,00	10,70	13,60	18,00	21,40	20,40	19,50	25,20	13,60	8,80
1984	7,90	7,00	7,80	13,70	11,70	16,00	20,30	19,80	17,70	22,70	12,60	8,80
1985	6,50	9,90	8,40	11,40	13,90	18,00	20,20	19,80	18,30	25,30	13,40	8,80
1986	7,30	7,70	9,00	9,80	14,40	17,00	18,80	21,90	18,90	25,00	11,40	7,70
1987	11,00	7,60	8,30	11,30	12,70	17,00	21,20	21,40	21,20	27,90	11,60	9,90
1988	9,40	6,50	7,60	10,60	14,20	17,00	21,00	21,70	17,50	27,30	12,40	7,20
1989	6,40	7,50	9,60	10,30	13,30	17,00	20,40	22,60	19,80	24,40	12,50	11,70
1990	8,00	8,70	9,80	10,20	14,70	18,00	19,90	20,10	21,40	26,60	12,20	7,00
1991	6,30	6,60	10,10	9,30	10,80	17,00	20,00	20,80	20,80	22,20	10,10	6,20
1992	5,90	6,50	8,50	10,10	13,00	15,00	19,00	19,90	19,40	24,70	11,80	8,80
1993	5,50	6,60	7,90	10,50	14,30	18,00	20,20	21,60	18,10	24,70	10,70	8,40
1994	7,70	7,50	9,30	9,20	14,90	18,00	20,50	23,70	20,60	24,80	12,40	8,80
1995	7,30	9,50	9,00	9,20	14,60	18,00	20,00	21,10	18,50	25,70	12,30	11,10
1996	10,00	7,90	9,80	12,00	13,40	17,00	19,90	21,40	17,00	23,30	11,50	10,50
1997	9,50	8,00	7,60	10,50	15,80	19,00	20,30	21,40	20,00	25,10	14,20	9,60
1998	8,60	8,70	8,60	11,20	14,50	18,00	20,00	20,90	19,70	23,80	11,00	7,30
1999	7,90	5,60	9,30	9,90	15,40	19,00	20,20	23,40	20,10	27,80	11,10	8,40
2000	5,20	7,30	9,00	11,20	15,60	18,00	21,40	21,50	19,20	24,30	11,90	9,58
2001	9,00	7,10	11,90	10,70	13,50	19,00	20,20	21,50	19,60	28,80	11,10	6,90
2002	7,00	7,60	9,40	10,60	13,50	17,00	20,50	20,80	18,40	25,70	12,30	10,60
2003	8,20	6,90	10,00	11,90	14,50	20,00	25,20	23,40	19,70	25,10	12,50	8,30
2004	7,60	8,90	9,70	10,50	13,10	17,00	20,70	22,00	19,40	28,30	10,70	9,00
2005	4,60	5,90	9,20	11,90	14,50	18,00	21,30	20,50	18,50	26,10	11,40	8,10
2006	6,90	7,20	9,30	13,10	17,30	18,00	20,50	21,00	18,50	27,80	13,50	9,40
2007	8,10	9,80	9,00	14,00	14,90	19,00	20,40	22,20	19,00	24,10	10,90	8,10
2008	7,00	9,00	9,00	11,00	15,00	18,00	22,00	22,00	20,00	25,00	11,00	8,00
2009	8,00	7,00	8,00	10,00	15,00	18,00	22,00	22,00	19,00	25,00	12,00	10,00
2010	8,00	9,00	10,00	13,00	13,00	17,00	20,00	21,00	19,00	25,00	12,00	9,00
2011	7,70	6,90	9,30	12,40	14,40	17,50	21,20	21,00	19,00	25,80	12,50	8,70
2012	6,40	4,00	9,00	11,50	13,70	19,40	21,60	22,00	18,70	26,30	12,70	8,10
2013	7,40	5,90	9,80	11,40	13,30	15,50	20,00	20,00	19,40	27,90	11,30	8,20
2014	9,00	8,30	8,60	11,20	13,00	17,70	19,40	21,20	21,00	27,10	13,80	9,10
2015	7,10	7,50	8,60	11,90	14,30	17,20	20,80	22,10	19,70	26,10	11,40	8,50
2016	8,80	8,70	8,30	11,60	13,60	17,30	20,20					

**Tableau III.** Valeurs mensuelles des précipitations (mm) pour la station de Bejaia(19702016)

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUL	AUT	SEP	OCT	NOV	DEC
1970	30,90	56,00	130,70	215,70	67,60	1,20	12,40	0,00	1,00	186,70	2,80	131,70
1971	123,00	50,50	107,10	30,20	25,80	0,10	5,20	0,00	104,00	123,90	71,10	52,20
1972	155,90	67,40	93,30	86,80	89,70	25,10	4,40	16,50	106,00	76,40	20,50	230,00
1973	166,90	230,00	123,60	33,70	0,30	42,80	0,30	1,90	70,90	83,20	78,50	173,30
1974	21,80	163,50	161,10	105,00	2,20	7,10	8,30	1,70	75,10	227,00	43,60	40,30
1975	52,70	90,70	115,30	27,80	89,40	17,70	0,00	37,00	39,80	9,30	229,00	85,60
1976	131,80	140,80	66,10	72,10	47,10	30,50	47,30	19,20	47,30	99,70	138,00	72,40
1977	92,30	19,40	38,60	109,30	38,50	6,60	0,40	5,70	8,10	27,70	205,00	14,70
1978	124,50	78,90	144,10	111,90	50,80	1,90	0,10	0,00	15,20	90,50	106,00	10,10
1979	49,30	115,80	72,80	110,50	21,60	17,20	18,70	47,00	73,70	41,80	100,00	13,90
1980	48,30	26,50	118,30	94,30	35,10	1,70	1,30	4,00	3,30	42,90	159,00	386,20
1981	51,40	100,00	96,20	43,90	21,20	24,00	2,10	27,90	3,20	48,70	52,30	90,40
1982	299,10	100,20	57,70	49,40	74,40	0,80	0,40	39,10	23,60	107,70	112,00	226,40
1983	11,20	35,20	44,10	14,60	13,00	0,10	1,80	10,20	3,50	57,00	59,00	69,50
1984	221,40	189,70	90,00	25,50	60,00	8,90	0,60	3,60	17,40	262,50	6,00	215,00
1985	129,70	38,80	248,30	25,30	72,10	1,30	0,70	7,30	79,60	52,00	101,00	66,90
1986	125,50	81,00	183,40	35,60	12,50	22,10	4,50	4,70	37,30	184,10	136,00	222,20
1987	72,80	161,90	74,20	40,90	47,30	5,70	3,60	2,10	26,90	52,50	216,00	33,20
1988	39,90	94,70	69,20	56,30	44,90	50,20	0,00	1,80	61,10	0,90	242,00	206,80
1989	91,80	13,70	34,10	124,40	6,10	16,40	2,00	12,30	49,10	48,50	65,70	33,80
1990	123,20	1,02	43,70	58,40	85,80	16,90	8,70	2,50	3,40	41,40	72,20	295,50
1991	76,90	94,90	168,50	33,50	38,70	2,40	0,40	8,00	80,10	188,10	36,90	44,10
1992	160,60	53,30	115,10	125,00	47,60	37,00	3,40	0,00	3,10	31,80	52,50	260,40
1993	78,60	88,00	42,40	85,50	46,20	4,50	0,00	0,00	59,50	51,30	66,20	71,00
1994	55,30	81,70	0,80	55,60	8,40	2,10	0,20	0,60	133,00	73,60	18,20	149,40
1995	238,40	55,80	95,70	35,60	1,80	22,80	0,30	20,00	71,40	15,90	51,50	60,80
1996	105,70	220,40	58,90	118,30	43,90	38,80	9,60	4,10	37,60	47,00	95,10	54,00
1997	50,10	24,50	16,30	53,90	11,30	22,20	2,40	18,04	58,20	222,10	108,00	93,00
1998	16,10	79,60	60,70	95,40	160,30	3,30	0,00	10,42	45,90	81,40	185,00	129,30
1999	125,80	119,90	52,60	29,80	14,70	1,40	0,60	2,70	47,80	24,40	93,40	227,10
2000	72,90	21,70	13,90	27,30	53,70	5,30	1,40	0,00	13,00	76,50	30,90	65,50
2001	212,00	70,20	9,10	65,90	37,10	0,00	0,00	13,71	47,30	3,05	104,00	70,90
2002	68,80	103,60	57,50	18,10	23,50	0,00	116,08	28,10	61,70	36,10	193,00	315,00
2003	310,00	69,00	30,70	220,60	26,50	1,00	2,20	1,60	114,00	75,50	45,60	205,50
2004	147,90	54,60	86,90	110,40	69,90	26,00	0,00	5,00	18,80	30,40	178,00	128,40
2005	165,50	167,50	60,40	41,90	7,70	0,00	0,40	6,10	28,20	31,70	107,00	172,40
2006	126,70	141,00	46,50	17,30	53,30	4,80	1,02	34,55	35,30	21,30	13,30	132,70
2007	9,30	20,40	175,10	132,00	12,10	9,90	2,60	6,70	63,40	149,00	175,00	207,00
2008	7,00	20,00	120,00	37,00	66,00	7,00	3,00	4,00	144,00	61,00	131,00	73,00
2009	237,00	66,00	63,00	86,00	54,00	1,00	4,00	15,00	190,00	40,00	129,00	133,00
2010	53,00	55,00	107,00	44,00	57,00	38,00	1,00	6,00	39,00	135,00	162,00	70,00
2011	52,58	138,68	50,29	68,82	87,89	36,07	0,25	0,00	7,11	128,27	100,08	118,87
2012	89,90	323,36	74,94	198,39	7,36	95,51	1,02	2,03	333,76	83,56	106,43	57,15
2013	130,80	179,82	78,23	46,23	83,56	3,05	10,92	69,86	44,68	34,79	182,88	52,31
2014	84,56	56,64	138,17	17,27	10,16	66,8	0,76	1,27	6,1	76,21	9,15	262,89
2015	135,12	155,43	70,86	3,05	19,30	1,78	0,00	10,16	20,58	41,65	51,56	0,00
2016	101,09	109,98	199,39	49,27	55,62	19,06	0,00					

#### IV : Extrapolation des températures et précipitations pour le mont Takoucht

	jan	fev	mar	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	Dec
M	5,74	6,11	7,68	9,40	12,00	15,40	18,52	19,22	17,31	14,39	9,84	6,80
m	1,35	1,42	2,72	4,55	7,64	11,27	14,04	14,81	12,82	19,02	5,40	2,46
T	3,5	3,8	5,2	7,0	9,8	13,3	16,3	17,0	15,1	16,7	7,6	4,6
P	193,07	171,49	147,96	120,28	73,03	29,08	10,86	20,53	96,95	134,00	188,22	223,95

#### tableau V. Synthèse climatique

##### Annexe II. Liste des années caractéristiques (sortie de COFECHA)

Altitude	M (°C)	m (°C)	P (mm)	Q <sub>2</sub>	Bioclimat	Saison sèche
Bejaia (2 m)	30,03	7,53	791,82	120,67	Subhumide à hiver chaud	Mai- fin août
Takoucht (1 545 m)	19,22	1,35	1409,44	270,43	Hyper-humide à hiver frais	(Juin-août)

#### Liste de cernes épais

1548-----J	1659-----I	1750-----E	1864-----D
1553-----G	1660-----D	1761-----C	1866-----E
1558-----E	1661-----D	1762-----D	1868-----D
1563-----C	1662-----F	1764-----C	1872-----C
1564-----F	1673-----C	1765-----E	1881-----C
1567-----G	1674-----D	1767-----F	1888-----C
1569-----E	1675-----E	1768-----C	1889-----C
1570-----F	1684-----E	1773-----D	1890-----D
1571-----E	1689-----D	1775-----C	1901-----C
1579-----D	1690-----G	1779-----C	1906-----C
1581-----D	1694-----D	1781-----F	1915-----E
1588-----D	1700-----E	1788-----D	1917-----E
1589-----G	1702-----C	1789-----C	1930-----H
1590-----C	1703-----F	1790-----E	1932-----C
1595-----C	1706-----C	1792-----G	1948-----H
1596-----C	1717-----C	1793-----G	1952-----D
1602-----E	1718-----E	1803-----D	1953-----G
1603-----G	1719-----C	1813-----E	1968-----C
1604-----E	1720-----F	1815-----G	1969-----C
1606-----C	1723-----G	1816-----E	1976-----C
1608-----D	1728-----F	1818-----F	1977-----D
1610-----F	1730-----C	1821-----C	1978-----D
1623-----C	1734-----C	1830-----C	1985-----E
1624-----I	1735-----C	1833-----E	1992-----D
1625-----F	1736-----G	1843-----C	1998-----D
1626-----C	1740-----D	1844-----D	2003-----C
1631-----F	1745-----E	1845-----D	2008-----C
1633-----E	1746-----C	1846-----F	2010-----G
1642-----D	1747-----C	1847-----F	2011-----D
1643-----F	1748-----C	1848-----D	
1644-----E	1749-----D	1862-----H	

## Liste de cernes minces

1549--c	1653-d	1755--c	1869--c
1555f	1654i	1756-f	1870--c
1557-e	1655i	1770f	1875f
1561o	1663f	1776f	1877--b
1562m	1664g	1777g	1879h
1565-d	1667--c	1782g	1883--c
1573--c	1668--b	1783f	1894--c
1575g	1677f	1784-e	1903--c
1578-d	1678h	1795-d	1904k
1580--c	1679g	1796f	1922i
1585i	1680-d	1797f	1924f
1586--d	1692-e	1800--c	1928--b
1592-d	1697--c	1801--c	1935--c
1593g	1704-e	1802-d	1939--c
1600--c	1705-d	1807f	1942-d
1609--c	1709-d	1808--c	1944f
1613-d	1710j	1812-e	1945--c
1614p	1711--d	1822-d	1958-d
1615-d	1712--c	1823--b	1959f
1616--c	1713-e	1824-d	1961g
1618--b	1716--b	1827f	1962-d
1619h	1722h	1828-d	1965--c
1620-e	1724--b	1836-d	1983-d
1627-e	1725--c	1837-e	1994-d
1635-d	1726-d	1840h	1997-e
1637-e	1731--c	1841-e	1999-f
1645-f	1733-d	1852-f	2000--c
1646--c	1744--c	1855--b	2002g
1647--b	1751-f	1858h	2009--c
1650-e	1753o	1859g	2012-e
1651--c	1754k	1860--c	2016--b