

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI - TIZI OUZOU
FACULTÉ DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES



THÈSE

Présentée

Par Saïd SLIMANI

En vue de l'obtention du titre de docteur en sciences biologiques

Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'historique des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie

Soutenue publiquement le 08 / 12 / 2014

Devant le jury composé de :

Rachid MEDDOUR, Maître de conférences, UMM Tizi Ouzou	Président
Arezki DERRIDJ, Professeur, UMM Tizi Ouzou	Rapporteur
Emilia GUTIERREZ, Professeur, Université de Barcelone	Corapporteur
Safia BELHADJ, Professeur, UZA Djelfa	Examinatrice
Mahand MESSAOUDÈNE, Directeur de recherche, INRF Tizi Ouzou	Examineur
Farid BEKDOUCHE, Maître de conférences, UAM Béjaïa	Examineur

Remerciements

Cette thèse est le fruit de plusieurs années de travail d'équipe. Je ne serais pas arrivé au bout de cette entreprise sans l'apport précieux des nombreuses personnes qui ont toujours cru en moi.

Je tiens tout d'abord à remercier grandement le professeur Arezki Derridj, Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou, pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de ma thèse, ainsi que pour son attention et sa disponibilité malgré ses multiples charges. Il a toujours été à l'écoute de mes nombreuses interrogations, s'intéressant à l'avancée de mes travaux tout en me laissant autonome dans mes initiatives.

J'adresse toute ma gratitude à l'infatigable professeur Emilia Gutiérrez, Université de Barcelone, qui a coencadré ce travail et m'a accueilli dans son laboratoire dans le cadre de la finalisation de mon doctorat. Les nombreuses discussions que nous avons eues lors de mon séjour scientifique auprès d'elle, ainsi que ses conseils, m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. J'ai eu tout simplement la chance de bénéficier de sa grande compétence et de sa rigueur intellectuelle. Je le sais, je ne vous remercierais jamais assez. *Ha sido un verdadero placer trabajar contigo. ¡ Muchísimas gracias !*

La présente thèse n'aurait jamais eu lieu sans la rencontre inespérée du professeur Ramzi Touchan, Université de l'Arizona. Il m'a initié à la dendrochronologie, en me formant avant même ma première inscription en thèse. Il m'a appris à aller toujours plus loin, toujours plus haut, là où c'est toujours plus intéressant. Il m'a accompagné dans la plupart de mes sorties de terrain et je l'ai assisté dans quelques-unes de ses campagnes d'échantillonnage dans les massifs algériens, qu'il m'a fait d'ailleurs découvrir, en Turquie, en Grèce et en Corse : ce fut une expérience extraordinaire. J'apprécie son aide et celle de toutes les personnes qui ont participé à la datation de mes échantillons au *Laboratory of Tree-Ring Research*, Tucson, Arizona.

Je remercie également les docteurs Rachid Meddour (UMM Tizi Ouzou), Mahand Messaoudène (INRF Tizi Ouzou), Farid Bekdouche (UAM Béjaïa) et le professeur Safia Belhadj (UZA Djelfa) pour l'honneur qu'ils me font d'être dans

mon jury. Je tiens à vous assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt que vous portez à ce travail.

Je remercie infiniment messieurs Abdeltatif Gasmi et Messaoud Hamidi, respectivement conservateurs des forêts de Batna et de Khenchela, ainsi que Saïd Abderrahmani et Youcef Meribai, respectivement directeurs des parcs nationaux de Belezma et du Djurdjura, pour leur accueil et leur aide logistique lors de nos campagnes d'échantillonnage.

Je voudrais aussi exprimer particulièrement toute mon amitié et gratitude à messieurs Athman Briki, Abderrahmane Rezougui, Laïd Sebti, Tayeb Brima, Ammar Menasri, Bouzghaia Abdelmajid, Karim Gaga, Moussa Haddad et Kamel Cherifi, ainsi qu'aux personnels des institutions sus-citées, qui ont pris de leur temps pour organiser nos sorties de terrain et nous permettre de travailler dans de bonnes conditions.

Il serait difficile de citer tous les noms des collègues à qui je dois beaucoup. Une mention spéciale à ceux des Universités de Tizi Ouzou, de Béjaïa et de Ouargla, ainsi qu'à l'ami qui m'a relu et incité à me conformer aux rigueurs du français et de sa typographie. Ils se reconnaîtront.

Un grand merci à mes amis de l'Université de Barcelone qui ont su me soutenir et – surtout – me supporter, particulièrement durant les derniers mois de rédaction, qui n'ont pas toujours été des plus agréables...

Je termine en adressant toute mon affection à ma famille, en particulier à mes parents. J'ai souvent été loin, mais votre tendresse et votre amour me guident au quotidien. La dendrochronologie m'a appris le vrai sens du cerne : les vôtres sont d'une beauté extraordinaire !

*À la mémoire de nanna
(grand-mère, en kabyle de chez moi)*

Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'histoire des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie

Résumé

Les anneaux annuels de croissance du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) ont été utilisés afin (i) d'analyser la variabilité climatique passée, (ii) étudier la relation cerne-climat à long terme et (iii) tester le potentiel de cette espèce pour la reconstitution de l'histoire des incendies au niveau des régions des Aurès et de Kabylie (nord algérien). L'échantillonnage a porté, d'une part, sur la collecte de carottes à la tarière de Pressler sur des arbres vivants au niveau de huit sites répartis équitablement entre les deux régions et, d'autre part, sur la réalisation de sections transversales à la tronçonneuse sur du bois mort présentant des cicatrices de feu dans deux sites au niveau du mont Chélia (Aurès).

Sur le volet dendroclimatique, les précipitations d'octobre à juin ont été reconstruites sur les périodes 1761-2009 et 1898-2011 pour les régions des Aurès et de Kabylie respectivement. Elles sont caractérisées par une haute variation interannuelle à décennale. Cependant, la plus forte variabilité a été identifiée à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle et les sécheresses les plus sévères ont marqué les dernières décennies, avec un pic sans précédent enregistré au début du xxi^e siècle. Une forte synchronisation des patrons de croissance a été observée lors des périodes caractérisées par des conditions climatiques limitantes, dont les principales ont coïncidé avec trois épisodes de dépérissement du cèdre de l'Atlas, survenus entre la fin des années 1870 et le début des années 1880, vers la fin des années 1970 et entre la fin du xx^e siècle et le début du xxi^e siècle. Les résultats mettent en évidence l'augmentation sensible de la réponse commune des arbres sondés aux conditions macroclimatiques, avec une diminution concomitante des effets liés aux conditions locales de site et de peuplement. Ainsi, si l'évolution de la variabilité climatique continue sur la tendance actuelle, des régions plus ou moins éloignées connaîtront des conditions climatiques de plus en plus similaires. Ceci pourrait mener à une modification profonde, voire à la disparition par endroits, de conditions écologiques locales permettant la subsistance du cèdre de l'Atlas dans son milieu naturel.

L'histoire des incendies a été reconstituée pour les périodes 1507-1977 et 1303-1991 à Oued Tider et Thniet Zemroune respectivement. À notre connaissance, il s'agit des premiers résultats relatifs à la dendropyrochronologie en Afrique. La plupart des feux datés n'ont été enregistrés que sur un seul échantillon et le synchronisme entre les arbres et sites d'étude est faible. Nous admettons que le régime des incendies a été caractérisé par des feux de surface d'une intensité faible à modérée, avec une extension très limitée, dont la plupart a eu lieu pendant la saison estivale. Dans les peuplements étudiés, l'activité des incendies a été d'une fréquence élevée jusqu'à la première moitié du xix^e siècle. Ensuite, un déclin brutal a été observé avec la promulgation des premières lois relatives à l'utilisation des sols et des forêts en Algérie. Par ailleurs, l'analyse des époques superposées montre que les conditions climatiques à court terme n'ont eu aucun effet significatif sur le départ des incendies. Ceci justifie le rôle majeur des facteurs anthropogéniques dans le régime des incendies au niveau de la zone d'étude.

Mots-clés : dendroclimatologie, dendropyrochronologie, *Cedrus atlantica*, Aurès, Kabylie.

Tree-Ring reconstructions of climate and fire history at the Aurès and Kabylie regions, north Algeria

Abstract

Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) tree-rings were used to (i) analyze past climate variability, (ii) study climate-growth relationships and (iii) test the potential of this species for fire history reconstruction in the regions of Aurès and Kabylie (northern Algeria). The samples consisted of cores collected from living trees, using an increment borer, in eight sites equally distributed between the two regions, and fire-scarred cross-sections obtained from dead material, using a chainsaw, in two sites located in the mount Chélia (Aurès).

In the dendroclimatic section, October-June precipitations were reconstructed for the periods 1761-2009 and 1898-2011 for the regions of Aurès and Kabylie respectively. They were characterized by a high interannual to decadal variations. However, the highest variability of the reconstructed precipitations was observed from the second half of the 20th century and the most severe droughts have marked the last decades. The driest period the two regions have ever experienced was registered in the beginning of the 21st century. High synchronicity between the chronologies was observed during periods that were characterized by limiting conditions to growth, of which the main peaks coincided with three Atlas cedar dieback episodes that occurred between the late 1870s and the beginning of the 1880s, by the end of the 1970s and between the end of the 20th century and the beginning of the 21st century. In addition, the results showed a substantial increase in the common response of the cored trees to macroclimatic conditions, with a concomitant decrease of the local effects due to site and stand conditions. This suggests that in case the climate variability continues in its current trend, distant regions will experience more and more similar climate conditions. This could lead to considerable changes, and even disappearance in some areas, of specific ecological conditions that maintain Atlas cedar in its natural distribution area.

Fire history was reconstructed for the periods 1507-1977 and 1303-1991 for Oued Tider and Thniet Zemroune respectively. To the best of our knowledge, these are the first dendropyrochronological results reported in Africa. Most of fires were individual occurrences and the synchronicity between the samples and the sites was low. Recorded fire events could be surface fires with low-to-moderate severity and low spatial extent, of which most of them occurred in the summer. Prior to 1850, fire frequency was high in both sampled stands. Then, a sharp decline was registered after the promulgation of the first laws governing land and forest use in Algeria. Besides, the superposed epoch analysis did not reveal any significant effect of the short-term climate conditions on fire occurrence. This justifies that anthropogenic factors have played a major role in fire occurrence in the study area.

Keywords: dendroclimatology, dendropyrochronology, *Cedrus atlantica*, Aurès, Kabylie.

Reconstrucciones del clima y la historia de incendios a partir de los anillos de los árboles en las regiones de Aurès y Cabilia, norte de Argelia

Resumen

Hemos utilizado los anillos de crecimiento del cedro del Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) para (i) analizar la variabilidad del clima pasado, (ii) para estudiar las relaciones clima-crecimiento y (iii) probar el potencial de esta especie para la reconstrucción de la historia de incendios en las regiones de Aurès y Cabilia (norte de Argelia). Las muestras consistieron en testigos recolectados de árboles vivos, utilizando una barrena, en ocho sitios distribuidos por igual entre las dos regiones, y en secciones transversales con cicatrices de fuego de material muerto, usando una moto sierra, en dos sitios ubicados en los bosques de Chélia (Aurès).

En la sección de dendroclima, hemos reconstruido las precipitaciones de octubre a junio para los periodos 1761-2009 y 1898-2009 de las regiones de Aurès y Cabilia respectivamente, estas regiones se caracterizan por presentar una elevada variabilidad interanual y hasta decadal. La mayor variabilidad de las precipitaciones reconstruidas se observó a partir de la segunda mitad del siglo XX y las sequías más graves han marcado las últimas décadas. El período más seco registrado en las dos regiones se produjo a comienzos del siglo XXI. Durante los periodos de mayor limitación del crecimiento por el clima se observó una alta sincronía entre las cronologías, durante tres de dichos periodos se desencadenaron episodios de mortalidad de cedros. Estos episodios se produjeron a finales de 1870 y comienzos de 1880, a finales de la década de 1970 y entre el final del siglo XX y comienzos del XXI. Además, los resultados mostraron un aumento sustancial en la respuesta común de los árboles a las condiciones macro climáticas, con una disminución de los efectos locales debidas a las características de sitio y del rodal. Esto sugiere que, en el caso de que la variabilidad climática continúe en su tendencia actual, las regiones distantes experimentarán cada vez más condiciones climáticas similares. Esto podría dar lugar a cambios considerables, e incluso la desaparición en algunas zonas, de las condiciones ecológicas específicas que mantienen al cedro en su área de distribución natural actual.

La historia de incendios fue reconstruida para los periodos 1507-1977 y 1303-1991 para Oued Tider y Thniet Zemroune respectivamente. Hasta donde sabemos, estos son los primeros resultados dendropirocronológicos reportados en África. La mayoría de los incendios eran eventos individuales por lo que la sincronía entre las muestras y los sitios fue baja. Los incendios registrados podrían ser incendios de superficie de baja a moderada intensidad y pequeña extensión espacial, y la mayoría de ellos ocurrieron en el verano. Antes de 1850, la frecuencia de incendios fue alta en ambos bosques muestreados. Después se registró un fuerte descenso coincidiendo con la promulgación de las primeras leyes sobre el uso del suelo y los bosques en Argelia. Además, el análisis de época superpuesta no reveló ningún efecto significativo de las condiciones climáticas a corto plazo en la ocurrencia de incendios. Esto justifica que los factores antropogénicos han tenido un papel importante en la ocurrencia de incendios en el área de estudio.

Palabras clave: dendroclimatología, dendropirocronología, *Cedrus atlantica*, Aurès, Cabilia.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I. Écologie et biogéographie du cèdre de l'Atlas	5
1.1. Introduction.....	5
1.2. Aire naturelle du cèdre de l'Atlas.....	6
1.3. Caractères botaniques.....	7
1.3.1. Le port.....	7
1.3.2. L'écorce.....	7
1.3.3. Les aiguilles.....	8
1.3.4. Le système racinaire.....	9
1.3.5. Organes reproducteurs et reproduction.....	9
1.4. Caractéristiques écologiques.....	11
1.4.1. Topographie.....	11
1.4.2. Substrat.....	12
1.4.3. Bioclimat.....	12
1.5. Groupements végétaux du cèdre de l'Atlas.....	15
1.6. Régénération.....	16
1.7. Les ennemis du cèdre de l'Atlas.....	17
1.8. Conclusion.....	19
Chapitre II. Description du milieu d'étude	22
2.1. Introduction.....	22
2.2. Région des Aurès.....	23
2.2.1. Situation géographique et administrative des cédraies d'étude.....	23
2.2.2. Géomorphologie.....	24
2.2.3. Géologie.....	25
2.2.4. Sol.....	26
2.2.5. Climat.....	26
2.2.5.1. Précipitations.....	26
2.2.5.2. Températures.....	27
2.2.5.3. Synthèse climatique.....	28

2.2.6. Végétation.....	28
2.3. Région de Kabylie.....	29
2.3.1. Situation géographique et administrative des cédraies d'étude.....	29
2.3.2. Géomorphologie.....	30
2.3.3. Géologie.....	31
2.3.4. Sol.....	32
2.3.5. Climat.....	32
2.3.5.1. Précipitations.....	32
2.3.5.2. Températures.....	33
2.3.5.3. Synthèse climatique.....	33
2.3.6. Végétation.....	34
2.4. Conclusion.....	34
Chapitre III. Analyse et reconstruction climatique.....	37
3.1. Introduction.....	37
3.2. Matériel et méthodes.....	38
3.2.1. Échantillonnage.....	38
3.2.2. Préparation des échantillons.....	39
3.2.3. Interdatation et établissement des chronologies maîtresses.....	40
3.2.4. Données climatiques.....	43
3.2.5. Analyse du signal climatique.....	43
3.2.6. Reconstruction climatique des précipitations.....	45
3.3. Résultats.....	46
3.3.1. Développement des séries dendrochronologiques.....	46
3.3.1.1. Chronologies de la région des Aurès.....	46
3.3.1.2. Chronologies de la région de Kabylie.....	50
3.3.2. Analyse du signal climatique.....	54
3.3.2.1. Analyse du signal climatique pour la région des Aurès.....	54
3.3.2.2. Analyse du signal climatique pour la région de Kabylie.....	58
3.3.3. Reconstruction climatique.....	60
3.3.3.1. Reconstruction des précipitations pour la région des Aurès....	60

3.3.3.2. Reconstruction des précipitations pour la région de Kabylie...	63
3.4. Discussion.....	67
3.4.1. Caractéristiques des chronologies développées.....	67
3.4.2. Analyse du signal climatique.....	70
3.4.3. Reconstruction des précipitations.....	71
3.5. Conclusion.....	76

**Chapitre IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité
climatique.....**

4.1. Introduction.....	79
4.2. Matériel et méthodes.....	81
4.2.1. Variabilité de la croissance radiale.....	81
4.2.2. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les sites et régions d'étude.....	82
4.2.3. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne entre les sites et régions d'étude.....	83
4.3. Résultats.....	83
4.3.1. Variabilité de la croissance radiale.....	83
4.3.1.1. Croissance radiale au niveau de la région des Aurès.....	83
4.3.1.2. Croissance radiale au niveau de la région de Kabylie.....	88
4.3.2. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les arbres.....	92
4.3.2.1. Variance commune de la croissance au niveau de la région des Aurès.....	92
4.3.2.2. Variance commune de la croissance au niveau de la région de Kabylie.....	95
4.3.3. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne.....	98
4.3.3.1. Variabilité de la sensibilité moyenne au niveau de la région des Aurès.....	98
4.3.3.2. Variabilité de la sensibilité moyenne au niveau de la région de Kabylie.....	101

4.4. Discussion.....	104
4.4.1. Variabilité de la croissance radiale.....	104
4.4.2. Variance commune de la croissance.....	104
4.4.3. Variabilité de la sensibilité moyenne.....	107
4.5. Conclusion.....	109
Chapitre V. Fire history of Atlas cedar (<i>Cedrus atlantica</i> Manetti) in mount Chélia, northern Algeria.....	112
5.1. Introduction.....	113
5.2. Material and methods.....	114
5.2.1. Study area.....	114
5.2.2. Fire-scar sampling and analyses.....	116
5.2.3. Seasonality of past fires.....	117
5.2.4. Fire-climate analysis.....	118
5.3. Results.....	118
5.3.1. Fire regimes.....	118
5.3.2. Fire seasonality.....	122
5.3.3. Fire-climate relationships (Superposed epoch analysis).....	123
5.4. Discussion.....	124
5.4.1. Fire regimes.....	124
5.4.2. Fire seasonality.....	126
5.4.3. Fire-climate relationships.....	127
5.5. Conclusions.....	128
Conclusion générale.....	130
Références bibliographiques.....	136
Annexes.....	152

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques ombrothermiques des différents blocs de cédraies naturelles de l’Afrique du Nord (M’Hirit, 1999).....	13
Tableau 2.1. Caractéristiques géographiques et topographiques des sites de la région des Aurès.....	23
Tableau 2.2. Caractéristiques géographiques et topographiques des sites de la région de Kabylie.....	30
Tableau 3.1. Nombre d’arbres sondés lors des différentes campagnes d’échantillonnage au niveau des deux régions d’étude.....	39
Tableau 3.2. Caractéristiques des chronologies de la région des Aurès (COFECHA).....	46
Tableau 3.3. Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN pour la région des Aurès (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = Arstan).....	49
Tableau 3.4. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) des séries ajustées (Aju.) et résidus des séries (Res.) pour l’intervalle commun des chronologies de la région des Aurès.....	49
Tableau 3.5. Longueurs des chronologies résiduelles au seuil d’EPS de 0,85 pour la région des Aurès.....	50
Tableau 3.6. Caractéristiques des chronologies de la région de Kabylie.....	50
Tableau 3.7. Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN pour la région de Kabylie (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = Arstan).....	52
Tableau 3.8. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) des séries ajustées (Aju.) et résidus des séries (Res.) pour l’intervalle commun des chronologies de la région de Kabylie.....	53
Tableau 3.9. Longueurs des chronologies résiduelles au seuil d’EPS de 0,85 pour la région de Kabylie.....	53
Tableau 3.10. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région des Aurès. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson et la valeur p (n = 249).....	54

Tableau 3.11. Périodes présentant les plus fortes corrélations entre la CPI et les précipitations. r est le coefficient de corrélation de Pearson, * indique un seuil α de 0,05 et ** un seuil de 0,01.....	56
Tableau 3.12. Stabilité temporelle de la corrélation entre la CPI et les précipitations de la première à la deuxième sous-période d'analyse...	56
Tableau 3.13. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région de Kabylie. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson et la valeur p ($n = 114$).....	58
Tableau 3.14. Statistiques de calibration et validation du modèle de reconstruction par la méthode d'échantillon fractionné. Pour tous les coefficients de détermination $p < 0,001$	60
Tableau 4.1. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région des Aurès. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson (r), le nombre d'observations (n) et la valeur p	85
Tableau 4.2. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région de Kabylie. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson (r), le nombre d'observations (n) et la valeur p	90
Table 5.1. Site characteristics	116
Table 5.2. Information of fire-scar dates.....	119
Table 5.3. Summary of fire interval statistics for the two sites.....	120

Liste des figures

Figure 1.1. Aire de répartition naturelle du cèdre de l'Atlas (Quézel, 1998).....	6
Figure 1.2. Individu de cèdre de l'Atlas (cédraie de Guetiane).....	8
Figure 1.3. Rameau du cèdre de l'Atlas (M'Hirit et Benzyane, 2006).....	9
Figure 1.4. Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Toth, 2001 <i>in</i> Philippe <i>et al.</i> , 2006).....	10
Figure 2.1. Localisation des sites d'études pour la région des Aurès.....	23
Figure 2.2. Localisation des sites d'études pour la région de Kabylie.....	30
Figure 3.1. Surface poncée d'une carotte après montage sur un support en bois rainuré (échantillon TIG41B).....	40
Figure 3.2. Fréquences en cerne absents (barres verticales) pour les quatre sites d'étude de la région des Aurès. La ligne en pointillé représente le nombre d'arbres datés.....	48
Figure 3.3. Graphique éboulis des valeurs propres (ligne continue) et test des bâtons brisés (ligne en pointillé) pour les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région des Aurès. Les composantes sont significatives lorsque la courbe des valeurs propres passe au-dessus de la courbe générée par la procédure des bâtons brisés.....	55
Figure 3.4. Corrélations entre la CP1 des chronologies de la région des Aurès 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.....	55
Figure 3.5. Diagrammes de dispersions entre la CP1 et les précipitations (P) pour la région des Aurès.....	57
Figure 3.6. Graphique éboulis des valeurs propres (ligne continue) et test des bâtons brisés (ligne en pointillé) pour les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région de Kabylie. Les composantes sont significatives lorsque la courbe des valeurs propres passe au-dessus de la courbe générée par la procédure des bâtons brisés.....	59

Figure 3.7. Corrélations entre les scores factoriels de la CP1 et les précipitations mensuelles (P) pour la région de Kabylie sur la période 1982-2011. L'astérisque (*) indique les mois de l'année t-1.....	59
Figure 3.8. Précipitations d'octobre à juin observées (ligne continue) et estimées (ligne en pointillée) sur la période totale de calibration 1931-2009 pour la région des Aurès. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1.....	61
Figure 3.9. Précipitations reconstruites d'octobre à juin sur la période 1761-2009 pour la région des Aurès. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1.....	62
Figure 3.10. Sévérité de la sécheresse sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année pour la région des Aurès. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.....	63
Figure 3.11. Précipitations d'octobre à juin observées (ligne continue) et estimées (ligne en pointillée) sur la période totale de calibration 1983-2011 pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1	64
Figure 3.12. Précipitations reconstruites d'octobre à juin sur la période 1898-2011 pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1.....	65
Figure 3.13. Sévérité de la sécheresse sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année pour la région de Kabylie. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.....	66
Figure 3.14. Précipitations reconstruites d'octobre à juin pour nos deux régions d'étude sur la période commune 1898-2009. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1.....	67
Figure 4.1. Chronologies maîtresses résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 pour la région des Aurès.....	84
Figure 4.2. Évolution de la corrélation entre les chronologies résiduelles pour la région des Aurès. Le coefficient de corrélation de Pearson est calculé sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.....	86

Figure 4.3. Fréquences relatives en cernes épais et minces pour la région des Aurès.....	87
Figure 4.4. Chronologies maîtresses résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 pour la région de Kabylie.....	89
Figure 4.5. Évolution de la corrélation entre les chronologies résiduelles pour la région de Kabylie. Le coefficient de corrélation de Pearson est calculé sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.....	90
Figure 4.6. Fréquences relatives en cernes épais et minces pour la Région de Kabylie.....	91
Figure 4.7. Évolution spatiotemporelle de la variance exprimée par les trois premières composantes principales (CP1, CP2 et CP3) pour la région des Aurès. 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.....	93
Figure 4.8. Relation entre la CP1 et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct^*-juin}$) pour la région des Aurès. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année...	94
Figure 4.9. Évolution spatiotemporelle de la variance expliquée par les trois premières composantes principales (CP1, CP2 et CP3) pour la région de Kabylie. 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.....	96
Figure 4.10. Relation entre la CP1 et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct^*-juin}$) pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année..	97

Figure 4.11. Évolution dans le temps de la variance exprimée par les trois premières composantes principales (CP1, CP2 et CP3) impliquant les huit sites échantillonnés dans nos deux régions d'étude sur la période commune 1898-2009. 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.....	98
Figure 4.12. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne pour la région des Aurès. Les barres verticales représentent l'écart type. 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.....	99
Figure 4.13. Relation entre la sensibilité moyenne (SM_x) et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct^*-jui}$) pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année.....	100
Figure 4.14. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne pour la région de Kabylie. Les barres verticales représentent l'écart type. 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.....	102
Figure 4.15. Relation entre la sensibilité moyenne (SM_x) et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct^*-jui}$) pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année.....	103
Figure 4.16. Évolution dans le temps de la sensibilité moyenne impliquant les huit sites de nos deux régions d'étude sur la période commune 1898-2009. Les barres verticales représentent l'écart type. 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.....	103
Figure 5.1. Location of the study area. Map redrawn from Bentouati (2008).....	115

Figure 5.2. Study sites, OUT and THZ, in the Atlas cedar forest of Chélia.....	115
Figure 5.3. Dated fire scars shown on an Atlas cedar cross-section, sample OUT 03.....	119
Figure 5.4. Composite fire history chart. Horizontal lines are maximum life span of trees. Vertical lines are composite fire dates recorded by the trees.....	121
Figure 5.5. Fire frequency (number of fires/period) for OUT and THZ, using moving periods of 51-years. The frequencies are plotted on the central year of the moving period.....	122
Figure 5.6. Seasonality of fires for the two studied sites (A) and percentage of each fire season based on samples where fire seasonality could be established (B).....	122
Figure 5.7. The superposed epoch analysis for OUT and THZ based on all fire dates for the period 1473-2010. The precipitation time series used was based on a tree-ring reconstruction of October-June precipitation (Kherchouche <i>et al.</i> , 2012). The "n" value is the number of fire years used in the calculations. Dark and dashed lines represent 99 % and 95 % confidence limit respectively.....	123

Introduction générale

Introduction générale

La variabilité climatique et les feux de forêts sont des sujets de recherche d'actualité constituant des défis majeurs et urgents pour l'aménagement et la conservation des ressources naturelles (Touchan *et al.*, 1996 ; Swetnam *et al.*, 2009). Prévoir leurs évolutions futures repose sur la compréhension de leurs tendances passées. Cependant, entreprendre de telles études nécessite une masse de données représentatives s'étalant sur de longues périodes. Malheureusement, les séries climatiques obtenues au niveau des stations météorologiques et les rapports sur les incendies de forêts sont, dans la plupart des cas, loin de couvrir des périodes permettant d'atteindre ces objectifs. C'est le cas en Algérie où, malgré que les mesures de données climatiques aient commencé au début des années 1900, elles se trouvent souvent entachées de lacunes et ne sont utilisables qu'à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle (Touchan *et al.*, 2008a). Il en est de même pour les rapports sur les incendies de forêts. Nos recherches sur ce domaine ont buté sur un manque cruel de données qui sont souvent fragmentaires et disponibles uniquement sur les dernières décennies. Devant ce manque d'informations, l'utilisation d'autres indicateurs liés à ces phénomènes environnementaux s'impose. À cet effet, la dendrochronologie se présente comme une alternative très intéressante, pouvant palier ces insuffisances sur le plan spatiotemporel (Fritts, 1976).

Le principe de base de la dendrochronologie est l'utilisation des différentes propriétés des anneaux de croissance des arbres pour reconstituer l'historique des changements environnementaux et des phénomènes qui leurs sont associés (Touchan et Hughes, 2000). Ses applications à la climatologie (dendroclimatologie) et à l'écologie forestière (dendroécologie) sont très avancées. Cependant, la plupart des études réalisées a été menée au niveau du continent américain (e.g. Douglass, 1939, 1945 ; Fritts, 1976 ; Wigley *et al.*, 1984 ; Cook et Briffa, 1990 ; Stokes et Smiley, 1996 ; Bergeron *et al.*, 2002 ; Biondi et Qeadan, 2008) et en Europe (e.g. Tessier, 1982 ; Guibal et Tessier, 1988 ; Gutiérrez, 1988, 1991 ; Tardif *et al.*, 2003 ; Touchan *et al.*, 2005a, 2014 ; Andreu *et al.*, 2007 ; Dorado Liñán *et al.*, 2012). La majorité des études réalisées dans la région méditerranéenne a été effectuée au

niveau de la rive nord. En Afrique du Nord, seul le Maroc possède un riche historique en dendrochronologie, dont un bon nombre de travaux traitent de la dendroclimatologie (e.g. Berger *et al.*, 1979 ; Guiot *et al.*, 1982 ; Till, 1987 ; Till et Guiot, 1990 ; Chbouki, 1992 ; Chbouki *et al.*, 1995 ; Esper *et al.*, 2007 ; Ilmen, 2014). La dendrochronologie algérienne est, au contraire, relativement récente. Les études dans ce domaine sont rares et la plupart s'est limitée à l'analyse de la relation cerne-climat (e.g. Messaoudène, 1989 ; Safar *et al.*, 1992 ; Safar, 1994 ; Messaoudène et Tessier, 1997 ; Alileche, 2012 ; Slimani *et al.*, 2014). À notre connaissance les seules études consacrées à la reconstruction dendroclimatiques dans notre pays sont celles publiées par Touchan *et al.* (2008a, 2010) et Kherchouche *et al.* (2012, 2013). Par ailleurs, sur le plan dendroécologique, la quasi-totalité des études ayant trait à la reconstitution de l'historique des incendies a été réalisée aux USA (e.g. Wagener, 1961 ; Taylor, 1980 ; Baisan et Swetnam, 1990 ; Grissino-Mayer *et al.*, 1995 ; Touchan et Swetnam, 1995 ; Touchan *et al.*, 1995, 1996 ; Beaty et Taylor, 2008 ; Swetnam *et al.*, 2009 ; Mundo *et al.*, 2013). Ce genre d'étude reste encore très rare en Europe (e.g. Zackrisson, 1977 ; Fulé *et al.*, 2008 ; Niklasson *et al.*, 2010) et à notre connaissance, aucune publication n'a été consacrée à cet aspect au niveau du continent africain.

Dans le présent travail nous tentons, d'une part, d'apporter une contribution permettant d'étendre nos connaissances sur la dendroclimatologie algérienne et méditerranéenne et, d'autre part, de fournir des éléments originaux avec une première étude traitant du domaine de la dendropyrochronologie. Nos recherches reposent sur l'utilisation des cernes annuels de croissance du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) afin d'appréhender la variabilité climatique passée et l'historique des incendies au niveau de deux régions montagneuses du nord algérien, les Aurès et la Kabylie.

La présente thèse est organisée en cinq chapitres. Le premier est consacré à l'écologie et biogéographie de notre matériel biologique, le cèdre de l'Atlas. Dans le deuxième chapitre est présenté un aperçu général de nos aires d'étude. Les méthodes d'étude et les résultats de nos recherches sont exposés dans les trois

chapitres suivants. Le chapitre troisième a trait à la reconstruction climatique. Il s'agit, dans un premier lieu, d'établir les chronologies maîtresses pour chaque site échantillonné et de définir lesquelles des séries standardisées sont fiables pour la reconstruction. Ensuite, une analyse est effectuée au préalable pour déterminer la variable climatique à reconstruire. Enfin, une reconstruction est établie pour la variable déterminée pour chacune de nos régions d'étude. Le quatrième chapitre repose sur les chronologies et reconstructions climatiques établies dans le chapitre précédent. Il porte sur l'analyse de la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique. Dans cette partie sont analysées les relations cerne-climat à travers l'étude de la variabilité de la croissance radiale, la réponse commune des arbres sondés, ainsi que leur sensibilité à la variabilité climatique. Les résultats issus de ces deux derniers chapitres sont comparés à ceux rapportés dans diverses études dans la région méditerranéenne. Enfin, le cinquième et dernier chapitre expose les premiers résultats publiés sur la dendropyrochronologie du cèdre de l'Atlas. Dans cette partie l'historique des feux est reconstitué pour deux sites localisés dans le mont Chélia, au cœur du massif de l'Aurès. L'étude porte sur le régime des incendies ainsi que leur saisonnalité et analyse la part des influences des facteurs naturels et anthropogéniques sur leur occurrence.

Chapitre I
Écologie et biogéographie du cèdre de l'Atlas

Chapitre I

Écologie et biogéographie du cèdre de l'Atlas

1.1. Introduction

Les cèdres, représentés par quatre espèces essentiellement montagnardes, occupent des surfaces d'importance inégale et forment spontanément trois blocs géographiques distincts: Afrique du Nord - Asie mineure - Himalaya. Le premier bloc représenté par le cèdre de l'Atlas, comprend: l'Atlas marocain, le Rif et l'Atlas algérien. Le deuxième bloc se divise en deux parties occupées chacune par une espèce particulière: le cèdre du Liban (*Cedrus libani* Barrel), au Liban, en Syrie et en Turquie dans le Taurus et l'Amanus ; le cèdre de Chypre (*C. brevifolia* Henry), dans l'île de Chypre, en forêt de Paphos sur une surface très restreinte. Le troisième bloc, avec le cèdre de l'Himalaya (*C. deodara* Loudon), représente les grands massifs de l'Inde et de l'Afghanistan sur le nord-ouest de l'Himalaya (M'Hirit, 1994).

Le cèdre de l'Atlas, « Inguel », « Idkil » ou « Idil » en berbère, « Arz el Atlas » en arabe, constitue indiscutablement l'essence noble des forêts du Maroc et de l'Algérie (Benabid, 1994) et représente un capital forestier de première importance, tant du point de vue strictement économique qu'écologique. Malheureusement, de nos jours, de nombreuses cédraies sont en état avancé de dégradation (Abdessemed, 1984, 1985 ; Benabid, 1994 ; Bonin, 1994 ; Bentouati, 2008 ; Ghanem, 2011 ; Linares *et al.*, 2011). Quézel (1998) note qu'un bon nombre de cédraies marocaines et algériennes sont en état de simple survie et destinées à disparaître dans les prochaines décennies ; tel est le cas en particulier pour toutes les cédraies continentales. Ainsi, en Algérie, si les forêts de l'Atlas tellien sont encore relativement bien conservées, celles de l'Atlas saharien sont en régression drastique.

Par ailleurs, si l'aire naturelle du cèdre de l'Atlas est en régression continue, l'espèce a été introduite avec succès depuis le milieu du XIX^e siècle, d'abord comme espèce ornementale, avant d'être utilisée comme essence de reboisement afin de créer des peuplements forestiers productifs stables (M'Hirit, 1999). Des résultats prometteurs ont été signalés dans plusieurs aires possibles de l'Europe

méditerranéenne, avant son extension à d'autres régions du Vieux Continent, jusqu'en Crimée et dans le Caucase, ainsi que dans quelques états américains : Pennsylvanie, New York, Côte pacifique (Emberger, 1938 ; Toth, 1980 ; Andrea et Roberto, 1994 ; Csaba, 1994 ; Delkov et Grozev, 1994 ; M'Hirit et Benzyane, 2006). En outre, ayant complètement disparu en Tunisie, sa réintroduction à partir du début des années 1960 a aussi donné des résultats satisfaisants (Dahman et Khouja, 1994).

1.2. Aire naturelle du cèdre de l'Atlas

L'aire naturelle du cèdre de l'Atlas est présentée sur la figure 1.1. Au Maroc il occupe le Rif (y compris les sommets du Tazzeka) (10 000 ha), le Moyen-Atlas oriental (10 000 ha), le Moyen-Atlas tabulaire (60 000 ha) et le Haut-Atlas oriental (moins de 10 000 ha). En Algérie, l'aire de distribution du cèdre de l'Atlas est moins importante qu'au Maroc. Les cédraies s'individualisent en îlots plus ou moins importants observés d'ouest en est. L'espèce occupe l'Atlas tellien avec les cédraies de l'Ouarsenis et Teniet el Had (1 000 ha), de l'Atlas blidéen (1 000 ha), du Djurdjura (2 000 ha) et des Babors (500 ha), ainsi que l'Atlas saharien avec les cédraies des monts du Hodna (5 000 ha), du Belezma (5 000 ha) et du massif de l'Aurès (5 000 ha).

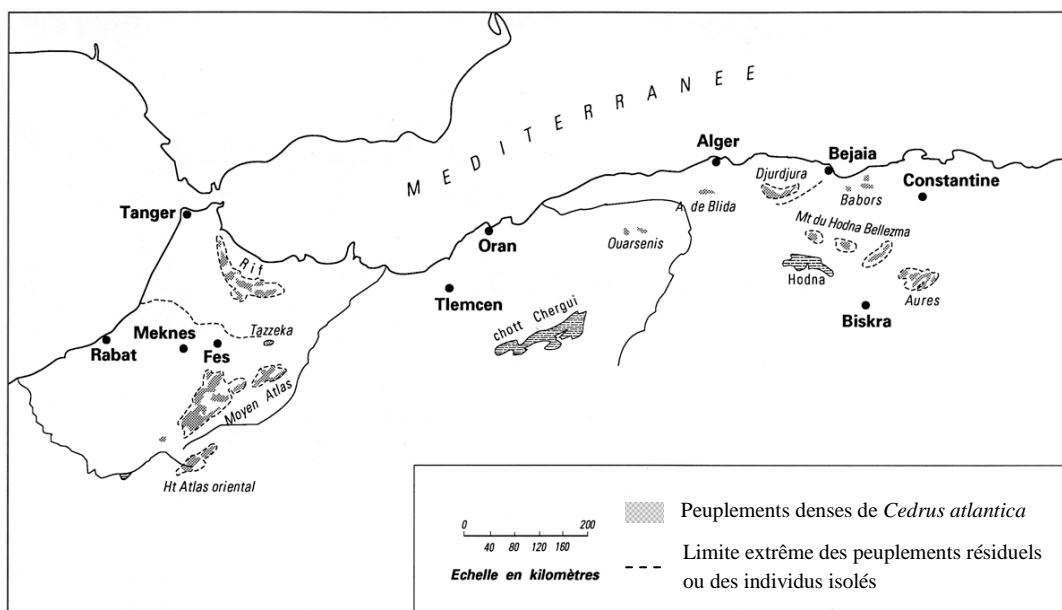


Figure 1.1. Aire de répartition naturelle du cèdre de l'Atlas (Quézel, 1998).

La répartition du cèdre de l'Atlas est nettement disjointe et liée essentiellement à l'orographie du Maghreb (Quézel, 1998). Par ailleurs, il est à noter que les superficies occupées par cette essence devraient être revues à la baisse suite au dernier épisode de dépérissement forestier qui a sévi dans la région, notamment au niveau l'Atlas saharien où des peuplements ont enregistré des taux de mortalité dépassant les 90 %.

1.3. Caractères botaniques

1.3.1. Le port

Le cèdre de l'Atlas, espèce monoïque, est un arbre magnifique pouvant atteindre 40 m de hauteur et 2 à 3 m de circonférence (fig. 1.2). 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 Benzyane, 2006). Dans des conditions particulières, le tronc peut prendre des dimensions considérables. Boudy (1952) note que l'arbre dépasse souvent 50 m pour atteindre 60 m dans les peuplements soit anciens en sol profond, soit serrés. Aussi, l'auteur signale que dans la région d'Azrou au Maroc, les arbres de plus de 8 m de tour ne sont pas rares. Des individus dépassant les 3 m de circonférence sont aussi nombreux au niveau de nos sites d'étude, notamment dans les monts Chélia, Ichmoul, Guetiane et à Tala Guilef, dans le Djurdjura.

Le fût puissant de l'arbre se termine par la flèche ; c'est la pousse terminale si grêle, si fine et si souple qu'elle se recourbe et cède à la moindre brise. Elle produit continuellement des bourgeons d'où naîtront les branches (M'Hirit et Benzyane, 2006). Le fût du cèdre a des formes et des dimensions très variables selon les conditions écologiques. La cime est trapue quand l'arbre est isolé, et prend une forme tabulaire à un âge avancé. Au contraire, dans les peuplements serrés les arbres prennent une forme élancée (Boudy, 1952).

1.3.2. L'écorce

Le tronc du cèdre l'Atlas est recouvert d'une écorce lisse de couleur grise bientôt remplacée par un rhytidome épais, rugueux et noirâtre ; de profonds sillons

le parcourent et conduisent l'eau des précipitations aux racines (Maire, 1952 ; M'Hirit et Benzyane, 2006).



Figure 1.2. Individu de cèdre de l'Atlas (cédraie de Guetiane).

1.3.3. Les aiguilles

Les feuilles de cèdre sont groupées au sommet de très courts rameaux, en petits bouquets de 30 à 40 aiguilles (mésoblastes) (fig. 1.3) ou isolées et soudées à l'écorce sur des rameaux longs (auxiblastes). Un bourgeon occupe le centre de ces couronnes. Les aiguilles, de 1 à 2 cm de longueur, sont raides, glauques ou vertes et vivent généralement trois ans (Toth, 1990 *in* Alileche, 2012 ; M'Hirit et Benzyane, 2006).



Figure 1.3. Dessin d'un rameau du cèdre de l'Atlas (M'Hirit et Benzyane, 2006).

1.3.4. Le système racinaire

Le système racinaire du cèdre de l'Atlas est développé, mais rarement pivotant (Boudy, 1952). Il est extrêmement puissant, semblable à une gigantesque griffe qui étreint le sol pour en extraire les éléments minéraux, l'eau et donner à l'arbre la solidité et le port majestueux qui le caractérisent (M'Hirit et Benzyane, 2006).

1.3.5. Organes reproducteurs et reproduction

Étant une espèce monoïque, les organes mâles et femelles du cèdre de l'Atlas sont portés par des rameaux courts sur le même arbre. Néanmoins, ayant abordé la dioïcité apparente du cèdre de l'Atlas, Toth (2005) rapporte que certains arbres ne portent que des cônes ou des chatons mâles et signale aussi une séparation nette au niveau des branches d'un même arbre qui ne portent que rarement les organes mâles et femelles en même temps. Krouchi (2010) note qu'en dépit de la monoécie de l'espèce, on peut observer une diécie fonctionnelle chez les arbres dont certains tendent à être plutôt femelles et d'autres plutôt mâles.

Les organes mâles sont des chatons et les organes femelles sont des inflorescences qui se développent progressivement en cônelets puis en cônes. Le

cycle reproducteur du cèdre de l'Atlas, à l'instar de celui des cèdres méditerranéens, est caractérisé par une floraison automnale (Toth, 2001 *in* Philippe *et al.*, 2006). L'arbre se couvre d'inflorescences situées aux extrémités des rameaux ; ce sont de gros chatons ovoïdes de 2 à 3 cm de longueur et larges de 1 à 1,5 cm émergeant d'une collerette de feuilles. La moindre brise emporte le nuage impalpable de pollen vers les fleurs femelles qui sont groupées en minuscules pommes de pins à écailles écartelées (M'Hirit et Benzyane, 2006).

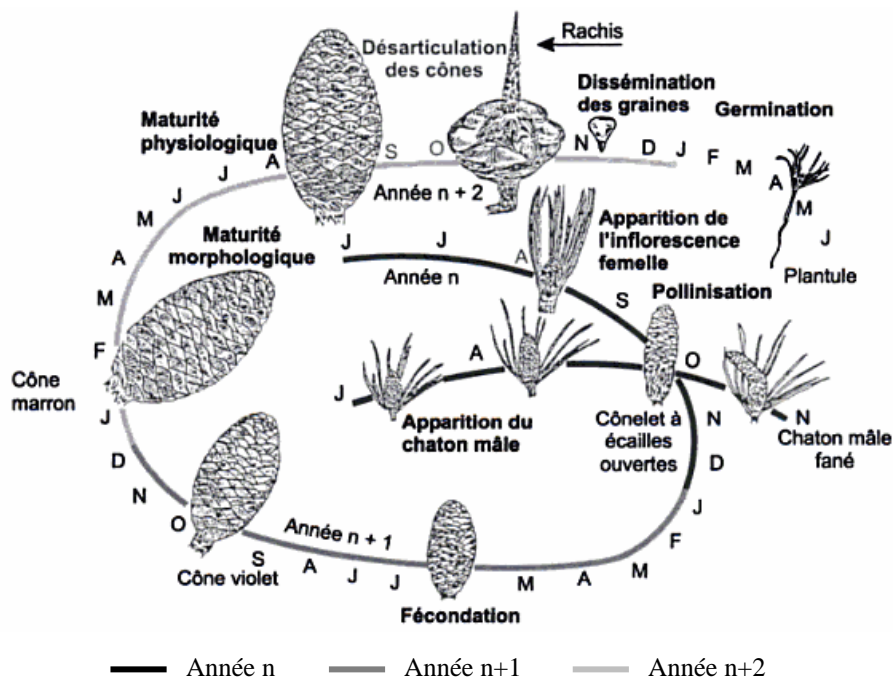


Figure 1.4. Cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas (Toth, 2001 *in* Philippe *et al.*, 2006).

Le cycle de reproduction du cèdre de l'Atlas est présenté dans la figure 1.4. Les strobiles mâles apparaissent à la fin 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 de 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 seront toutefois libérées qu'un an plus tard, à l'automne n+2 ou durant l'hiver suivant (Philippe *et al.*, 2006). Le moment de la dissémination venu, le cône

s'effeuille au vent, les graines ailées volent loin et seul l'axe du cône persiste assez longtemps. Contrairement à ce que l'on constate chez les pins, c'est l'humidité et non la sécheresse qui détermine la déhiscence des cônes (M'Hirit et Benzyane, 2006).

1.4. Caractéristiques écologiques

1.4.1. Topographie

Le cèdre de l'Atlas est une espèce de moyennes et hautes montagnes. Ses limites altitudinales varient selon les conditions climatiques et le relief (Emberger, 1938). D'après M'Hirit (1994), au Maroc, la limite inférieure se situe entre 1 400 m dans le Rif occidental et 1 800 m dans le Haut-Atlas oriental. La limite supérieure varie entre 2 000 m au Moyen-Atlas et 2 400 m dans le Rif central et Haut-Atlas oriental. En Algérie, la limite inférieure se situe entre 1 350 m dans les massifs de l'Aurès et du Belezma et 1 400 m dans les massifs du Djurdura et des Babors. La limite supérieure se situe quant à elle entre 2 200 m dans le Djurdjura et les Babors et 2 300 m dans l'Aurès et le Belezma.

Lors de nos sorties de terrain nous avons observé plusieurs sujets à des altitudes inférieures à 1 000 m sur les versants nord des massifs étudiés. Derridj (1990) souligne la localisation des plus belles cédraies sur les versants septentrionaux et la différence des limites inférieures du cèdre de l'Atlas, plus basses en versant nord qu'en versant sud. Krouchi (2010) rapporte qu'à Tala Guilef, sur le versant nord du Djurdjura, la cédraie s'étend depuis 1 100 m environ, dans les ravins, où les jeunes cèdres constituent de belles plages de rajeunissement. Meddour (1994), signale que la cédraie de Chréa, située dans l'Atlas blidéen, le massif algérien le moins élevé coiffé par une cédraie, débute vers 1 000 à 1 100 m d'altitude sur le flanc nord par l'apparition de nombreux cèdres isolés ou en bouquets dans la forêt de chêne vert (*Quercus ilex*), alors que sur le flanc sud, la cédraie ne commence que vers 1 400 m d'altitude.

Par ailleurs, les cédraies introduites en France à Saumon dans les Préalpes de Digne et dans les massifs du Ventoux, du Luberon et du Chablais se développent convenablement à des altitudes de 300 à 930 m (Sabatier *et al.*, 2003).

1.4.2. Substrat

L'originalité édaphique du cèdre de l'Atlas réside tout particulièrement dans sa rusticité et son indifférence à la nature lithologique du sol (M'Hirit, 1994). Cependant, les cédraies circumméditerranéennes sont généralement localisées sur des substrats calcaires (Quézel, 1980 *in* Krouchi, 2010). En Algérie, une grande partie des cédraies se concentre sur des roches mères siliceuses, et en bien moindre proportion sur roches calcaires (Boudy, 1950 *in* Megdoud, 2012).

L'indifférence du cèdre vis-à-vis de la roche mère a été soulignée depuis longtemps. D'après Faurel (1947) et Lepoutre (1961) *in* M'Hirit (1994), le cèdre se rencontre sur des substrats et des sols variés: 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. Les types de sols rencontrés dans les cédraies sont du type fersiallitiques sur calcaires, rendzine magnésienne sur dolomie, andosolique sur basalte, ocrepodzolique sur grès avec une richesse en matière organique et en fer. Abdessemed (1981), rapporte que les cédraies de l'Aurès et du Belezma présentent une certaine prédilection pour les grès et les dolomies. Cependant, cette préférence pour ces deux roches très éloignées chimiquement l'une de l'autre s'expliquerait beaucoup plus par les caractères physiques que les caractères chimiques. En effet, les deux roches donnent des sols légers qui facilitent le développement racinaire des jeunes semis et leur permettent d'échapper à la sécheresse estivale. Putod (1979) note que le cèdre de l'Atlas peut s'accommoder même de sols peu évolués qu'il continue à améliorer grâce à son humus de bonne qualité. Néanmoins, il se développe mieux sur des sols profonds, meubles, caillouteux et fissurés ; les sols mal drainés et hydromorphes, comme les argiles, sont défavorables à son développement (Schonenberger, 1970 et Toth, 1981 *in* Megdoud, 2012).

1.4.3. Bioclimat

Les caractéristiques ombrothermiques des cédraies de l'Afrique du Nord sont données dans le tableau suivant.

Tableau 1.1. Caractéristiques ombrothermiques des différents blocs de cédraies naturelles de l’Afrique du Nord (M’Hirit, 1999).

Cédraie	Altitude (m)	Précipitation annuelle (mm)	Températures extrêmes (°C)	
			M	m
Rif Occidental	1 400 - 2 300	1 390 - 1 186	24,1 à 28,3	-5,6 à -0,2
Rif central	1 500 - 2 400	1 257 - 1 707	23,7 à 28,8	-5,6 à -0,4
Rif oriental	1 700 - 2 200	906 - 1 311	24,6 à 26,6	-5,0 à -1,8
Moyen-Atlas tabulaire	1 500 - 2 000	871 - 1 066	27,6 à 30,9	-4,7 à -0,5
Moyen-Atlas oriental	1 800 - 2 000	615 - 927	26,5 à 28,7	-6,4 à -3,1
Haut-Atlas oriental	1 800 - 2 400	499 - 799	23,2 29,6	-8,3 à -3,1
Aurès - Belezma	1 350 - 2 300	499 - 790	23,2 à 29,6	-8,3 à -3,1
Djurdjura - Babors	1 400 - 2 200	1 200 - 1 700	16,8	-8,5

Le tableau 1.1 montre que les cédraies du Rif et de l’Atlas tellien (Djurdjura et Babors) sont bien arrosées. Elles reçoivent une précipitation de l’ordre de 906 à 1 707 mm. Les cédraies les moins arrosées sont celles du Haut-Atlas oriental et de l’Atlas saharien (Aurès et Belezma) avec une hauteur de précipitation variant entre 499 et 799 mm. Putod (1979) note que le cèdre reçoit dans ces pays d’origine des lames de pluies annuelles comprises entre 450 et 1 500 mm. Du point de vue précipitation, Derridj (1990) regroupe les cédraies algériennes en trois ensembles. Le premier réunit les cédraies du Djurdjura septentrional et des Babors avec une précipitation de 1 600 à 2 100 mm, le second englobe les cédraies occidentales de l’Ouarsenis, de Chréa, de Meurdja et du versant méridional du Djurdjura avec une précipitation de 1 260 à 1 420 mm et le troisième et dernier ensemble est constitué des cédraies méridionales du Hodna et des Aurès recevant une précipitation de l’ordre de 720 à 770 mm.

Le tableau 1.1 montre que l’ensemble Djurdjura-Babors croît sous une température moyenne maximale (M) de 16,8 °C. Il s’agit de la valeur la plus basse de tous les blocs de cédraies naturelles présentés. Les autres cédraies affichent des valeurs comparables allant de 23,2 à 30,9 °C. La température moyenne minimale (m) varie quant à elle entre -8,5 et -0,2 °C. Boudy (1950) et Pujos (1964) *in* Derridj (1990) notent que le cèdre de l’Atlas se développe sous des températures moyennes

annuelles de l'ordre de 8 à 14 °C. Selon Putod (1979), les cédraies spontanées se développent sous des extrêmes absolus compris entre -25 et +35 °C. Pour les cédraies algériennes, Derridj (1990) rapporte des températures moyennes maximales de l'ordre de 26 à 39 °C.

Le cèdre de l'Atlas s'étend, en ambiance bioclimatique subhumide et humide, de l'étage méditerranéen supérieur froid dans le Moyen-Atlas, le Rif et les Aurès à l'étage oroméditerranéen extrêmement froid dans le Haut-Atlas (M'Hirit, 1994). Quézel (1998) note que les cédraies de basse altitude sont essentiellement localisées en bioclimat humide alors que celles de moyenne et haute altitude peuvent répondre plutôt à des bioclimats subhumide, humide voire perhumide. Les cédraies supérieures, essentiellement oroméditerranéennes, doivent quant à elles se rattacher plutôt à la variante extrêmement froide du bioclimat méditerranéen subhumide.

L'optimum bioclimatique du cèdre de l'Atlas correspond à l'étage montagnard-méditerranéen entre 1 600 m et 2 000 m d'altitude (Achhal *et al.*, 1980 *in* M'Hirit, 1994). Quézel (1998) signale que les cédraies les plus productives et les mieux individualisées du point de vue floristique, doivent se rapporter essentiellement au bioclimat méditerranéen humide alors que les autres, pour des critères soit climatiques, soit écophysiologicals, se rattachent en général au bioclimat méditerranéen subhumide. Par ailleurs, l'auteur note que l'existence de cédraies de l'Atlas en bioclimat semi-aride est encore discutée en l'absence de données météorologiques fiables ; elle est toutefois probable, en particulier sur les revers méridionaux de l'Aurès et des monts du Hodna.

En Algérie, les cédraies de l'Atlas saharien (Aurès-Belezma, monts du Hodna), situées aux portes du désert, se positionnent dans l'étage bioclimatique subhumide froid à très froid, tandis que celles de l'Atlas tellien (Atlas blidéen, massifs du Djurdjura et des Babors), proches de la mer Méditerranée, appartiennent à l'étage humide à perhumide frais à froid (Meddour, 1994 ; Krouchi, 2010).

L'aire naturelle du cèdre de l'Atlas est caractérisée par une période d'enneigement, très variable selon les années, variant en fonction de l'altitude et de l'exposition entre 3 et 5 mois en moyenne. Il en est de même pour la durée de la

période de sécheresse estivale, qui varie entre 1 mois (bioclimat perhumide) et 4 à 5 mois sur les marges du bioclimat aride (Quézel, 1998).

1.5. Groupements végétaux du cèdre de l'Atlas

Emberger (1938) note que les cédraies de l'Afrique du Nord sont, dans l'ensemble, floristiquement assez homogènes, mais une étude plus détaillée montre de nombreuses différences. Partout le cèdre de l'Atlas est plus ou moins associé au chêne vert, houx (*Ilex aquifolium*), if commun (*Taxus baccata*), à des chênes à feuilles caduques, sorbier torminal (*Sorbus torminalis*) et sorbier des Alpes (*S. aria*), nerprun des Alpes (*Rhamnus alpina*), aubépine lacinée (*Crataegus laciniata*), cotonéaster à grappes (*Cotoneaster fontanesii*), petit-houx (*Ruscus aculeatus*), etc. Dans le Grand Atlas oriental, l'if et le houx manquent. Chaque région, aussi bien au Maroc qu'en Algérie, a ses endémiques et ses espèces reliques.

Le cèdre de l'Atlas individualise en Afrique du Nord un certain nombre de groupements végétaux variés dans une amplitude altitudinale importante entre 1 500 et 2 500 m (M'Hirit, 1994, 1999). Ces groupements s'intègrent, d'après leurs critères floristiques et en fonction de leurs exigences écologiques, soit dans la classe de *Quercetea ilicis* dans l'ordre des *Quercetalia ilicis*, soit dans la classe des *Quercetea pubescentis* dans l'ordre de *Quercetalia atlanticae* (Abdessemed, 1981, Benabid, 1985 ; Meddour, 2010, Megdoud, 2012). M'Hirit (1994, 1999) les classe comme suit :

– Les communautés végétales de la cédraie-sapinière dans le Rif (*Abies maroccana-Cedrus atlantica*) avec l'if commun, le houx, le chêne zéen (*Q. mirbekii*) et l'érable opale (*Acer granatense*) et dans les Babors (*A. numidica-Cedrus atlantica*) avec l'érable à feuilles obtuses (*A. obtusatum*).

– Les communautés végétales de la cédraie à chêne vert avec le houx et l'érable de Montpellier (*A. monspessulanum*) dans le Moyen-Atlas et le Rif marocain ;

– Les communautés de la cédraie mésophile dans le Moyen-Atlas, le Rif, l'Ouarsenis où dominant le genêt ananas (*Argyrocyttisus battandieri*) et le houx ;

– Les communautés de la cédraie orophile dans la dorsale calcaire du Rif, du Moyen-Atlas oriental et les Aurès avec les genévriers thurifère (*Juniperus thurifera*) et oxycèdre (*J. oxycedrus*) et des xérophytes épineux.

En Algérie, Maire (1926) in Krouchi (2010) décrit une association de cèdre de l'Atlas avec deux faciès :

– La cédraie pure se développe surtout sur les sols peu profonds. Elle est assez bien représentée sur quelques points de l'Atlas blidéen. La strate arborescente est formée de cèdre pur avec une présence mineure de chêne vert buissonnant, houx, if commun, genêt à trois pointes (*Genista tricuspidata*), épine-vinette (*Berberis hispanica*), églantier agreste (*Rosa agrestis*) et rosier des haies (*R. canina*).

– La cédraie mixte se développe surtout sur les sols profonds des montagnes bien arrosées. Elle est typique dans les montagnes des Aït Ouabane (Djurdjura nord-oriental). En plus du cèdre de l'Atlas, la strate arborescente est composée de chêne zéen (*Q. lusitanica* var. *mirbeckii*), sorbier des Alpes, érable à feuilles d'obier (*Acer opulifolium*), prunier merisier (*Prunus avium*) et de houx.

1.6. Régénération

Pour des hauteurs de précipitations normales ou supérieures à la normale, la date d'apparition des premières germinations est commandée par l'évolution de la température maximale et 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). La tranche thermique 15 à 20 °C semble être la plus favorable à la germination des graines de cèdre (Toth, 1978 in Nezar Kebaili, 2009). Cependant, les jeunes semis peuvent être fortement affectés par les froids tardifs et/ou la précocité de la sécheresse estivale (Lepoutre, 1964 ; Bentouati, 1993 in Talbi, 2010). 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.

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 du cèdre (Boudy, 1952).

1.7. Les ennemis du cèdre de l'Atlas

– Les insectes

Le cèdre de l'Atlas est sujet aux attaques d'insectes ravageurs, dont un bon nombre est capable de coloniser plusieurs hôtes (Fabre *et al.*, 1999). On peut les classer en trois catégories : les insectes phyllophages, les insectes xylophages et les insectes des fleurs et des graines (Mouna, 1994).

Les insectes phyllophages s'attaquent aux aiguilles du cèdre de l'Atlas provoquant de fortes défoliations (El Yousfi, 1994 ; Gachi, 1994 ; Fabre *et al.*, 1999). Dans cette catégorie nous citons la processionnaire du cèdre (*Thaumetopoea bonjeani*), la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), le puceron du cèdre (*Cedrobium laportei*), la tordeuse du cèdre du Liban (*Acleris undulana*) et les tordeuses d'Algérie *Epinotia algeriensis* et *Dichelia numidicola* (El Yousfi, 1989 ; Demolin, 1994 ; Fabre, 1994 ; Gachi, 1994 ; Fabre *et al.*, 1999). Dans les conditions naturelles, *Dichelia numidicola* a pour hôte principal le sapin, mais on a constaté que les chenilles pouvaient s'alimenter sur les cèdres poussant en mélange avec les sapins (Fabre *et al.*, 1999).

Les insectes xylophages s'attaquant au cèdre de l'Atlas appartiennent aux ordres des Coléoptères (Scolytidae, Buprestidae, Cerambycidae, Bostrychidae) et des Hyménoptères (Siricidae) (Fabre *et al.*, 1999 ; Benhalima, 2006). Ce sont des ravageurs redoutables capables de creuser des galeries impressionnantes dans les parties du bois plus ou moins tendre, causant d'importants dégâts qui peuvent entraîner des déséquilibres irréversibles se traduisant par la mort des arbres (Fabre, 1976). Ce sont les Scolytidae qui s'installent en premier. Ils attaquent d'abord les cimes et les branches puis, peu à peu, ravagent les parties inférieures de l'arbre-hôte. Des Scolytidae, *Cryphalus piceae* est l'une des espèces les plus caractéristiques, les plus abondantes et les plus nuisibles dans toutes les cédraies de l'Atlas (Benhalima, 2006). *Scolytus numidicus* est la seule espèce du genre vivant exclusivement aux dépens du cèdre de l'Atlas. On la rencontre, au Maroc (Moyen-

Atlas et Rif) et en Algérie (Chr ea dans l'Atlas blidéen et dans le Djurdjura) (Peyerimhoff, 1919, Kocher, 1958 et Chararas, 1974 *in* Fabre *et al.*, 1999). Les espèces de la famille des Buprestidae sont en général des xylophages secondaires. Leurs attaques ont lieu sur des cèdres affaiblis par les Scolytes. Les Cerambycidae sont des ravageurs secondaires qui attaquent le cèdre en cours de dépérissement (*Callidium cedri* et *Semanotus russica algerica*) ou les parties du bois en voie de décomposition avancée (*Ergates faber*) (Fabre *et al.*, 1999 ; Benhalima, 2006). Fabre *et al.* (1999) mentionnent deux Bostrychidae xylophages. Mouna et Graf (1994) *in* Talbi (2010) et Benhalima (2006) signalent la présence de *Bostricus fucus bicolor* et *Stephanopachys quadraticollis* avec de très faibles abondances au Maroc. Cette dernière espèce a aussi été signalée en Algérie par Brustel *et al.* (2013). Enfin, les Hyménoptères (Siricidae) ne sont représentés que par *Urocerus augur*. Cette espèce provoque des dégâts sur le cèdre en creusant des galeries circulaires très profondes dans le bois. L'Hyménoptère se porte de préférence sur les parties de calibre moyen comme certains troncs (Fabre *et al.*, 1999).

De nombreux insectes s'attaquent aussi aux organes reproducteurs et aux graines du cèdre de l'Atlas. El Hassani (1984) *in* Mouna (1994) mentionne deux Lépidoptères, *Dioryctria peyerimhoffi* et *D. peltieri*, et un Dipt re Chlorophidae, *Hapleginella laevifrons*, sur les cônes du cèdre. *Megastigmus pinsapinis*, Hyménoptères des cônes, existe au Maroc (Rif), en Algérie (  Chr ea dans l'Atlas blidéen et dans le massif de l'Aurès) et en France (Toth, 1971 *in* Megdoud, 2012 ; Fabre, 1994 ; Mouna, 1994).

– Les champignons

Peu de parasites cryptogamiques sont spécifiques du cèdre, à la différence des insectes qui lui sont le plus souvent strictement inféodés (Fabre, 1976). Rieuf (1971) *in* El Yousfi (1994) rapporte que plus d'une vingtaine de champignons vivent sur le cèdre. Parmi eux, deux xylophages, *Trametes pini* et *Ungulina officinalis* qui causent des dégâts importants. Le problème des xylophages est d'une grande importance et se pose d'une façon accrue pour le cèdre par le fait qu'ils constituent souvent l'étape qui suit l'affaiblissement de l'arbre (Mouna, 1994). *T. Pini*, ou

pourriture rouge du cèdre, est un Basidiomycète de la famille des polyporacées. *U. officinalis* est un polypore connu sous le nom de pourriture brune ou prismatique. Le champignon dégrade la cellulose et épargne la lignine. La pourriture s'étend du centre du tronc vers l'extérieur et dans le sens longitudinal. Le bois attaqué est un ensemble de prismes friables. L'arbre se présente en fin comme un tonneau peu épais rempli de cubes rouges de bois décomposé (Toth, 1971 *in* Megdoud, 2012 ; El Yousfi, 1994).

Lanier (1994) dresse une liste des champignons liés au cèdre en Algérie et en France. Parmi les espèces répertoriées six ont un rôle pathogène ou lignivore reconnu : *Armillaria mellea*, *Coriolus abietinus*, *Lophodermium cedrinum*, *Sparassis crispa*, *Stereum sanguinolentum*, *Trametes pini*. *A. mellea* est un parasite racinaire très dangereux. Les pourridiés à Armillaire sont d'autant plus importants que les conditions générales dans lesquelles se trouvent les cédraies favorisent leur extension: les fréquentes blessures aux racines provoquées par le surpâturage et l'érosion concomitante, la présence d'arbres morts sur pied ou de souches servant de réservoirs au parasite sont des facteurs aidant à l'extension de ses méfaits.

Toth (1971) *in* Megdoud (2012) signale l'effet de *Polyporis officinalis* qui attaque le bois du cèdre de l'Atlas et le déforme.

– L'activité humaine

L'activité anthropique est, sans conteste, l'élément le plus déterminant de la régression des cédraies (Abdessemed, 1981, 1984, 1985 ; El Yousfi, 1994). En effet, nos cédraies ont payé et payent toujours un lourd tribut aux activités humaines: exploitations mal contrôlées, délits (de subsistance ou à des fins commerciales), incendies, guerres et surtout pastoralisme et coupes anarchiques, qui ont considérablement réduit les surfaces significatives occupées encore par cette espèce (Abdessemed, 1984 ; Quézel, 1998).

1.8. Conclusion

Introduit dans plusieurs aires possibles un peu partout dans le monde, le cèdre de l'Atlas connaît une régression considérable dans son aire naturelle. Cette essence

forestière est l'hôte d'une multitude d'agents pathogènes causant des dégâts considérables. À cela se rajoute la sécheresse récurrente sans précédent que connaît la région méditerranéenne au cours des dernières décennies. Néanmoins, l'activité humaine reste le principal facteur de dégradation de nos cédraies et la situation actuelle risque de s'aggraver davantage si des mesures urgentes ne sont pas prises.

La préservation de nos cédraies passera par l'amélioration des conditions socio-économiques des populations locales et la mise en place de programmes de contrôle de l'activité pastorale, ainsi que de dispositifs de surveillance contre les incendies et les délits devenus de plus en plus fréquents. Aussi, est-il indispensable de multiplier les réseaux de recherches pluridisciplinaires, afin d'élaborer des plans d'aménagement durables permettant de sauvegarder ce patrimoine forestier.

Chapitre II
Description du milieu d'étude

Chapitre II

Description du milieu d'étude

2.1. Introduction

Notre aire d'étude est répartie sur neuf sites situés au niveau des cédraies des régions des Aurès et de Kabylie (nord de l'Algérie) constituant les limites septentrionale et méridionale de l'aire de distribution naturelle du cèdre de l'Atlas en Algérie.

Huit sites, à raison de quatre sites par région, ont été retenus pour la reconstruction des précipitations et l'analyse de la réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique : Thniet Zemroune (THZ), Ichmoul (ICH), Tuggurt (TUG) et Guetiane (GUE) pour la région des Aurès et Lfidh Mohand Ouali (LMO), Djamaa Tighrifine (DJT), Tigounatine (TIG) et Refuge Amirouche (REA) pour la région de Kabylie. Le choix des sites repose sur le critère « sensibilité ». Ainsi, au niveau des deux régions, les sites recherchés puis retenus pour l'échantillonnage sont ceux qui présentent des conditions plus ou moins limitantes pour la croissance des arbres, avec des sols peu profonds, une piérosité élevée et un drainage rapide, se présentant sur les pentes les plus raides possibles, de façon à augmenter la qualité du signal climatique contenu dans les cernes annuels (Douglass, 1939 ; Fritts, 1976 ; Cook, 1985).

Au départ, trois sites ont été retenus pour la reconstitution de l'historique des incendies. Malheureusement, les échantillons récoltés dans le Djurdjura n'ont pas donné de résultats concluants. Ainsi le volet dendroécologique de la thèse repose sur deux sites échantillonnés au niveau du mont Chélia, au cœur du massif de l'Aurès : Oued Tider (OUT) et Thniet Zemroune (THZ). Le choix des sites a été principalement guidé d'une part par la présence de cicatrices témoignant d'une activité antérieure de l'incendie et d'autre part par l'abondance de ces dernières, de manière à dater le plus grand nombre possible de feux différents pour assurer la représentativité de l'étude au niveau de chaque aire d'échantillonnage.

2.2. Région des Aurès

2.2.1. Situation géographique et administrative des cédraies d'étude

La situation géographique des sites d'étude est présentée dans la figure 2.1 et le tableau 2.1.

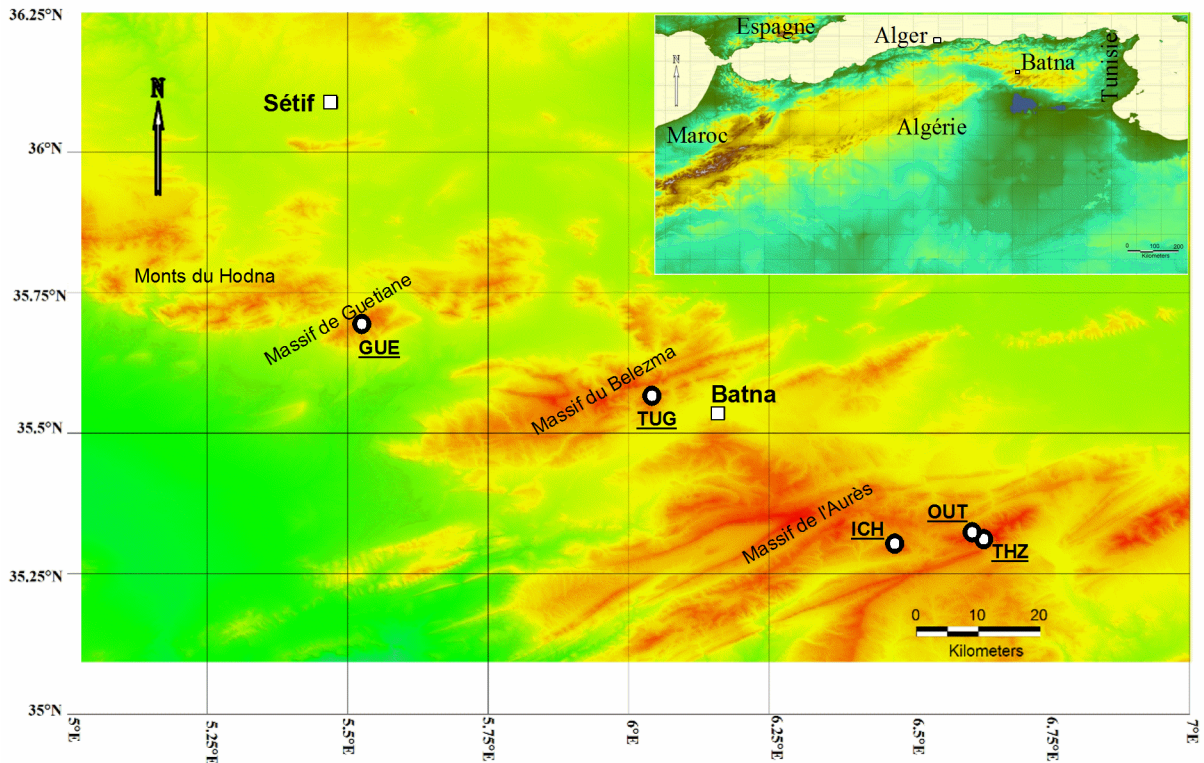


Figure 2.1. Localisation des sites d'études pour la région des Aurès.

Tableau 2.1. Caractéristiques géographiques et topographiques des sites de la région des Aurès.

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Exposition	Pente (%)
THZ	35,302549°N	6,628033°E	1927-1997	S	25
OUT	35,31052°N	6,62447°E	1834-1870	N-NO	25
ICH	35,305°N	6,481667°E	1867-1985	N-NE	40
TUG	35,566667°N	6,033333°E	1534-1750	N-NO	40
GUE	35,693056°N	5,5225°E	1627-1784	N-NO	40

Trois sites ont été échantillonnés dans le massif de l'Aurès. Deux sites, Thniet Zemroune et Oued Tider, sont adjacents, situés dans le mont Chélia à environ 60 kilomètres au sud-est de la ville de Batna. Leurs coordonnées géographiques sont

35,302549° nord et 6,628033° est et 35,31052° nord et 6,62447° est respectivement. Le troisième site est localisé sur le mont Ichmoul à environ 55 kilomètres au sud-est de la ville de Batna, aux coordonnées géographiques 35,305° nord et 6,481667° est. Thniet Zemroune fait partie de la circonscription forestière de Bouhmama, dépendant de la conservation des forêts de la wilaya de Khenchela. Les sites de Oued Tider et d'Ichmoul dépendent quant à eux de la circonscription d'Arris, faisant partie de la conservation des forêts de la wilaya de Batna. Le quatrième site est situé dans le mont Tuggurt au niveau du massif du Belezma, à environ sept kilomètres au nord-ouest de la ville de Batna. Ses coordonnées géographiques sont 35,566667° nord et 6,033333° est. Ce site fait partie du Parc National de Belezma, secteur de Hamla. Le cinquième et dernier site est localisé dans le massif de Guetiane à environ 60 kilomètres au nord-ouest de la ville de Batna, aux coordonnées géographiques 35,693056° nord et 5,5225° est. Ce massif est considéré comme un prolongement des monts du Hodna à la limite ouest des Aurès (Bentouati, 2008). La forêt domaniale de Guetiane est gérée par la circonscription de N'gaous dépendant de la conservation des forêts de la wilaya de Batna.

L'aire d'étude s'étale, selon la disponibilité des sujets échantillonnés, sur une superficie d'environ 2 ha à Oued Tider et Thniet Zemroune, 4 ha à Tuggurt et dépasse 5 ha à Ichmoul et Guetiane.

2.2.2. Géomorphologie

Notre aire d'étude est caractérisée par une série de chaînes montagneuses traversant les wilayas de Khenchela et de Batna d'est en ouest. Sur le plan topographique elle présente un ensemble plus ou moins homogène individualisé, avec des limites nettes, des hautes plaines au nord et du pré-Sahara au sud (fig. 2.1). Les trois massifs d'étude dépassent les 2 000 m d'altitude. Dans le Chélia, Ras Keltoum culmine à 2 328 m (Benmessaoud, 1981 *in* Alileche 2012). C'est le sommet le plus élevé de l'Algérie septentrionale.

L'altitude varie d'une aire d'échantillonnage à une autre. Les sites du massif de l'Aurès sont les plus élevés. Dans le Chélia, Oued Tider est situé au voisinage d'un cours d'eau portant le même nom, à une altitude allant de 1 834 à 1 870 m

avec une exposition nord à nord-ouest. Thniet Zemroune est quant à lui situé dans la partie supérieure, sur un col marquant la frontière entre les wilayas de Batna et de Khenchela. C'est le site le plus haut de notre aire d'étude. L'altitude varie entre 1 927 et 1 997 m. C'est aussi le seul site présentant une exposition sud. La pente est d'une moyenne de 25 % pour les deux sites. Les arbres sondés à Ichmoul se présentent sur une altitude de 1 867 à 1 885 m avec une exposition nord à nord-est. Dans l'ensemble la pente est raide. Elle est d'une moyenne de 40 %. Les sites de Guetiane et de Tuggurt sont localisés à des altitudes relativement inférieures à celles mentionnées pour les trois sites précédents. Tuggurt est le site le moins élevé. Son altitude varie entre 1 534 et 1 750 m. À Guetiane, les arbres échantillonnés se présentent à des altitudes allant de 1 627 à 1 784 m. Pour ces deux derniers sites, l'exposition est nord à nord-ouest avec une pente moyenne de 40 %.

2.2.3. Géologie

Selon Abdessemed (1981), la totalité des cédraies de l'Aurès et du Belezma s'étendent sur des terrains secondaires (Triasiques, Jurassiques et Crétacés). Selon Lafitte (1939) *in* Beghami (2010), les sites du massif de l'Aurès (Thniet Zemroune, Oued Tider et Ichmoul) reposent sur le crétacé inférieur d'âge Barrémien avec un faciès gréseux. L'Aptien est localisé juste au-dessus du Barrémien et sans limite précise. Il est constitué essentiellement par un faciès gréseux très fin, avec des affleurements dans tous les grands anticlinaux de l'Aurès. Par ailleurs, dans le Chélia (Thniet Zemroune et Oued Tider) on rencontre de l'Albien avec un faciès gréseux grossier où les calcaires sont réduits à de minces intercalations de grès et de marnes. La cédraie de Tuggurt repose quant à elle sur du Jurassique inférieur (Khanfouci, 2005 *in* Talbi, 2010). Le substrat pédologique est constitué principalement par des accumulations de marnes en basse altitude et de formations calcaires, calcaires dolomitiques et grès sur la partie supérieure (Lafitte, 1939 *in* Alileche, 2012). Enfin, d'après l'esquisse géologique du Djebel Guetiane-Tachirt (Guiraud, 1967 *in* Gouaref, 2012), le site de Guetiane repose sur le crétacé inférieur d'âge Barrémien et Aptien inférieur. Le terrain est constitué par une série d'alternance de marne, de grès fin et de rares petits bancs calcaires souvent

dolomitiques. Les calcaires deviennent plus abondants vers le haut de la formation qui se termine au pied d'une grosse barre dolomitique repère.

2.2.4. Sol

D'après Abdessemed (1981), les sols bruns peu calcaires, reposant sur des grès, représentent la totalité des sols du mont Chélia, aussi bien sur le versant nord que sur le versant sud. L'horizon A n'est jamais épais. La texture de l'horizon (B) est argilo-sableuse à limono-sableuse, devenant de plus en plus sableuse à la base. Celle de l'horizon C est argilo-sableuse à sableuse avec une charge caillouteuse dépassant les 80 %. Les arbres sondés à Tuggurt se développent sur des sols bruns calcaires avec des substrats marneux et accessoirement calcaires jusqu'à 1 600 m d'altitude. L'horizon A₀ est généralement moins épais que dans les sols bruns peu calcaires. La texture est argilo-limoneuse dans les horizons A₁₁ et A₁₂ et argilo-limoneuse à argileuse dans l'horizon (B) et argileuse dans l'horizon C. Au-delà de 1 600 m, les sols sont des rendzines décalcarisées en surface formées sur une roche mère constituée généralement par du calcaire plus ou moins fissuré. L'horizon A₀ est peu épais. L'horizon A₁₁ est bien aéré, humide, peu compact et présente une charge caillouteuse moyenne. L'horizon A₁₂ présente une texture argilo-limoneuse avec une charge caillouteuse de plus en plus forte. Cette dernière dépasse les 80 % dans l'horizon C, formé de gros cailloux à arêtes vives et où le taux de calcaire total dépasse les 50 %. D'après Durand *et al.* (1954) *in* Gouaref (2012), le site de Guetiane présente des sols insaturés humiques (sols brunifiés fersiallitiques) avec une texture limono-sablo-argileuse. Les carbonates y sont rares.

2.2.5. Climat

2.2.5.1. Précipitations

Dans la région des Aurès les précipitations sont caractérisées par de fortes irrégularités intra- et interannuelles. Le Houérou *et al.* (1977) note que l'isohyète 600 mm marque la limite inférieure de la cédraie. Les régions qu'elle ceinture correspondent aux plus hauts sommets des monts du Hodna, des Aurès et du Belezma. Selon Meharzi (1994), la répartition spatiale des pluies dans la région des

Aurès est principalement dictée par l'orographie et obéit à deux paramètres : la répartition hypsométrique (les secteurs les plus arrosés sont les plus élevés) et la disposition du relief nord-est/sud-ouest, donc perpendiculaire au flux perturbé du nord-ouest. Ainsi, les cédraies du Chélia et d'Ichmoul se situent sur un secteur humide recevant une précipitation annuelle oscillant entre 900 et 1 200 mm par an. Cette haute pluviosité s'explique aussi bien par l'altitude (c'est le secteur le plus élevé de l'Aurès) que par l'exposition nord-ouest du secteur. Situé dans le Belezma, à une altitude inférieure à celles des sites des monts Chélia et Ichmoul, mais dans une situation d'ubac, le site de Tuggurt fait partie quant à lui du secteur aux précipitations moyennes allant de 400 à 800 mm. Enfin, d'après les extrapolations de Gouaref (2012) à partir des données de la station météorologique de Ras El Aioun, notre aire d'étude au massif de Guetiane reçoit une hauteur de précipitation de l'ordre de 634 mm.

Dans la région des Aurès, le régime pluviométrique saisonnier est contrasté. Il peut être différent d'un massif à un autre, entre les versants d'un même massif, voire dans le temps au sein d'un même versant (Megdoud, 2012 ; Beghami, 2013). Dans notre aire d'échantillonnage, il est du type PAHE pour les sites du massif de l'Aurès (Thniet Zemroune, Oued Tider et Ichmoul) (Beghami, 2013) et PHAE pour Tuggurt (Nezar Kebaili, 2009 ; Alilèche, 2012) et Guetiane (Gouaref, 2012).

Les données de la station météorologique du S'gag, la seule à être située dans l'ambiance de la cédraie (Abdessemed, 1981), montrent que la durée de l'enneigement est d'environ 64 jours. Cette durée est dépassée surtout au Chélia et à Ichmoul. La durée d'enneigement à Batna est d'environ 8 jours. Elle est supérieure dans les hauteurs du Belezma (Seltzer, 1964 *in* Beghami, 2013 ; Abdessemed, 1981). À Guetiane le nombre de jours de neige dépasse une moyenne de 10 jours par an, chiffre enregistré au niveau de la station de Ras El Aioun (Gouaref, 2012).

2.2.5.2. Températures

La température moyenne annuelle est d'environ 14 °C pour les sites de Thniet Zemroune, Oued Tider et Ichmoul (Kherchouche *et al.*, 2012), 16 °C à Tuggurt (PNB, 2005, *in* Alileche, 2012) et 10 °C à Guetiane (Gouaref, 2012). La

température moyenne maximale du mois le plus chaud est enregistrée en juillet. Elle est d'environ 25 °C à Thniet Zemroune, Oued Tider et Ichmoul (Kherchouche *et al.*, 2012), 36 °C à Tuggurt (PNB, 2005 *in* Alileche, 2012) et 28 °C à Guetiane (Gouaref, 2012). La température moyenne minimale du mois le plus froid est observée en janvier. Elle est de l'ordre de -0,9 °C à Thniet Zemroune, Oued Tider et Ichmoul (Kherchouche, 2003 *in* Belloula, 2011), -0,4 °C à Tuggurt (PNB, 2005 *in* Alileche, 2012) et -3 °C à Guetiane (Gouaref, 2012).

2.2.5.3. Synthèse climatique

Selon Abdessemed (1981), la période sèche s'étale de mai à septembre à Thniet Zemroune, Oued Tider et Ichmoul. Dans le Belezma, Alilèche (2012) signale qu'en plus des mois considérés comme biologiquement secs (juin, juillet et août), on trouve des mois qualifiés de sub-secs. Il s'agit des mois de mai et de septembre où le total des précipitations est < 3T. Autrement dit, la sécheresse ne se limite pas uniquement à la saison estivale, où son intensité est plus importante mais empiète aussi sur le printemps (mai) et l'automne (septembre). En revanche, au secteur Chélia, les mois de mai et de septembre ne sont pas considérés comme des mois sub-secs. À Guetiane la saison sèche s'étale de la mi-mai à septembre (Gouaref, 2012).

Le climat de nos sites d'étude est de type méditerranéen subhumide à hiver froid (Abdessemed, 1981 ; Nezar Kebaili, 2009 ; Gouaref, 2012).

2.2.6. Végétation

Nos sites se présentent, selon leurs altitudes, dans des cédraies plus ou moins pures et claires avec une présence mineure du chêne vert et du genévrier oxycèdre à Thniet Zemroune, Oued Tider, Ichmoul et Guetiane, et dans une cédraie mixte semi-fermée, associée au chêne vert avec une présence importante du genévrier oxycèdre à Tuggurt, notamment dans la partie inférieure du site. La structure de la végétation est simple. Elle est dominée par la strate arborée formée essentiellement par le cèdre de l'Atlas. On y rencontre différentes classes d'âge. Cependant, la cédraie de Tuggurt est de loin la moins âgée de toutes. Elle est aussi la seule à

présenter une strate arbustive un peu développée, notamment dans les espaces libérés par les arbres dépéris. Cette strate est dominée par le genévrier oxycèdre, l'églantier des montagnes (*Rosa montana*) et l'aubépine monogyne (*Crataegus oxyacantha ssp. monogyne*) (Quézel et Santa, 1962, 1963). On y rencontre les mêmes espèces au niveau des autres cédraies, mais la strate arbustive est très peu fournie. La strate herbacée est relativement riche en espèces, mais présentant un aspect très dégradé.

Un fort taux de dépérissement du cèdre de l'Atlas, avoisinant les 70 %, a été observé à Tuggurt (Alilèche, 2012). Il en est de même au niveau de la cédraie de Guetiane où le dépérissement massif des arbres dépasse par endroits les 80 % (Gouaref, 2012). Néanmoins, ce phénomène caractérise les parties inférieures et moyennes de la cédraie, alors que notre aire d'échantillonnage recouvre la partie supérieure marquée par un taux de dépérissement très faible. Dans les autres sites, ce phénomène n'est observé que sur quelques pieds isolés. Les différentes aires d'échantillonnage présentent une bonne régénération du cèdre de l'Atlas. Cependant, les semis se développent sous la menace permanente du surpâturage. En outre, tous les sites témoignent d'une activité antérieure des incendies.

2.3. Région de Kabylie

2.3.1. Situation géographique et administrative des cédraies d'étude

La localisation des sites d'études pour la région de Kabylie est présentée dans la figure 2.2 et le tableau 2.2.

Les quatre sites de la région de Kabylie sont situés dans le massif du Djurdjura au sein du Parc National du même nom, à moins de 50 kilomètres à vol d'oiseau de la mer Méditerranée. Djamaa Tighrifine, Lfidh Mohand Ouali et Tigounatine sont localisés dans la partie sud du massif, faisant partie du secteur de Tikjda, territoire de la wilaya de Bouira. Leurs coordonnées géographiques sont 36,453312° nord et 4,10412° est, 36,450971° nord et 4,10839° est et 36,4553° nord et 4,111054° est respectivement. Le quatrième et dernier site est localisé dans la partie nord-ouest du massif, au niveau du lieudit Refuge Amirouche, faisant partie du secteur de Tala Guilef, dans la wilaya de Tizi Ouzou. Ses coordonnées géographiques sont

36,472409° nord et 4,00581° est. L'aire d'échantillonnage s'étale sur une superficie d'environ 2 ha au niveau de tous les sites.

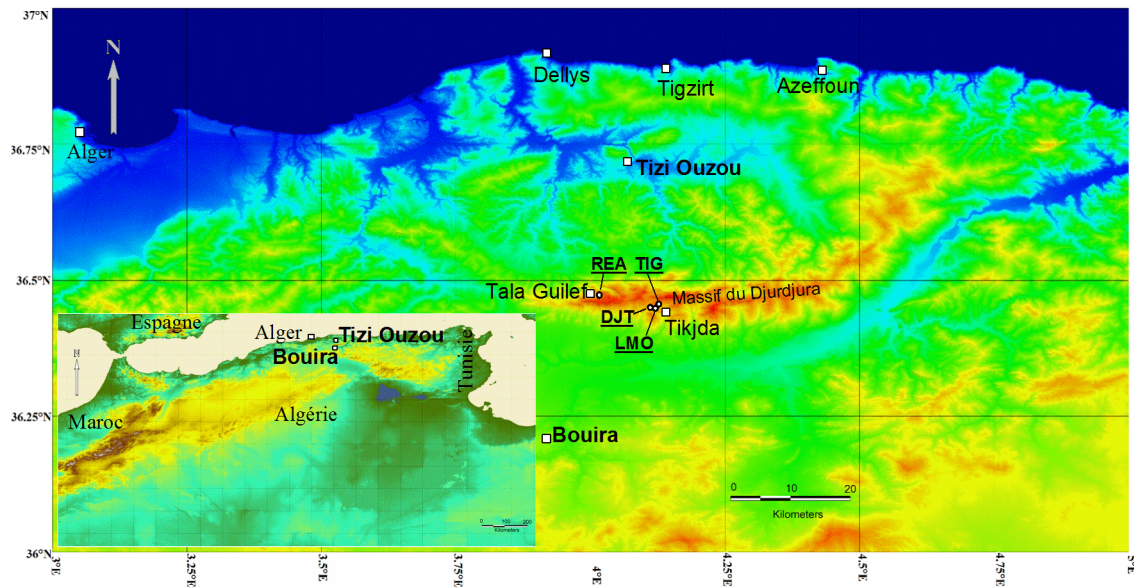


Figure 2.2. Localisation des sites d'études pour la région de Kabylie.

Tableau 2.2. Caractéristiques géographiques et topographiques des sites de la région de Kabylie.

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Exposition	Pente (%)
DJT	36,453312°N	4,10412°E	1445-1475	S	45
LMO	36,450971°N	4,10839°E	1497-1548	SO	35
TIG	36,4553°N	4,111054°E	1553-1640	S-SE	35
REA	36,472409°N	4,00581°E	1494-1577	S	35

2.3.2. Géomorphologie

Notre aire d'étude se positionne sur une zone de haute montagne caractérisée par des escarpements rocheux intégrant des portions de territoires des wilayas de Tizi Ouzou et de Bouira. Le point culminant du Djurdjura est représenté par le pic de Lalla Khedidja, situé à 2 308 m d'altitude (Lapie, 1909).

Les sites échantillonnés se situent à des altitudes plus ou moins comparables. À Djamaa Tighrifine, l'aire d'échantillonnée s'étale depuis 1 445 m, près d'un ruisseau, jusqu'au sommet du monticule situé à 1 475 m. La pente est d'une moyenne de 45 %. L'ensemble du terrain présente une exposition sud. Les arbres sondés à Lfidh Mohand Ouali se présentent entre 1 497 et 1 548 m avec une exposition sud-ouest. Tigounatine est le site le plus élevé. Les arbres échantillonnés sont localisés à une altitude comprise entre 1 553 et 1 640 m sur une exposition sud à sud-est. À Refuge Amirouche, l'altitude de l'aire d'étude varie entre 1 494 et 1 577 m. La plupart des arbres sondés se situent vers la crête. Ce site présente une exposition sud. La pente moyenne des trois derniers sites est de l'ordre de 35 %. Nous signalons que, dans plusieurs situations, les arbres sondés au niveau des quatre sites sont positionnés sur des escarpements.

2.3.3. Géologie

Le massif du Djurdjura est constitué de terrains sédimentaires fortement plissés et fracturés. Une partie des terrains s'est formée dans le courant de l'ère primaire, mais la plupart appartiennent aux ères secondaire et tertiaire (Flandrin, 1947 *in* Krouchi, 2010). L'axe de la chaîne du Djurdjura est formé par des calcaires liasiques durs et compacts, en bancs fortement redressés. L'assise inférieure est dolomitique. À la partie supérieure, au contraire, les calcaires deviennent marneux et sont enfin remplacés par les marnes (Lapie, 1909).

Les sites de Djamaa Tighrifine, Lfidh Mohand Ouali et Tigounatine reposent sur du calcaire dolomitique du lias inférieur (Flandrin, 1952 *in* Benmouffok, 1994). La région de Tala Guilef présente des formations éocènes et oligocènes : son terrain est structuré de grès de cette époque en alternance avec des marnes au niveau d'Acif Achemlili, et des conglomérats ou des poudingues dans le massif de Haizer, le Pic des Cèdres, Tazrout-Tamellalt et le Col Blanc (Thizi-Toumlilt). Les formations du lias supérieur y présentent leur développement le plus complet (Flandrin, 1952 *in* Krouchi, 2010).

2.3.4. Sol

Selon Benmouffok (1994), les sols développés dans les sites de Djamaa Tighrifine, Lfidh Mohand Ouali et Tigounatine sont peu évolués et appartiennent à la classe des sols calcimagnésiques. Ce sont des rendzines autochtones riches en éléments grossiers. La texture est limono-sableuse à sablo-limoneuse. Les profils sont de type A/C, humifères sur toute l'épaisseur du profil. Les teneurs en matières organiques sont élevées. Ceci peut s'expliquer par la nature de la roche mère, génératrice de calcaire actif qui immobilise les composés organiques, ainsi que la nature de la litière.

Les profils réalisés à différentes altitudes et expositions à Tala Guilef par Bensaad et Bellahcene (1988), Aouam et Kebir (1995) et Krouchi (2002) *in* Krouchi (2010) montrent des sols à texture limono-sableuse avec de faibles teneurs en argile et des taux de matière organique et rapports C/N plus ou moins élevé. Les profils réalisés sur une exposition sud, sur laquelle se trouve notre site, Refuge Amirouche, montrent des sols acides avec un humus de type Mor et Moder.

2.3.5. Climat

2.3.5.1. Précipitations

Le Djurdjura est l'une des régions les plus arrosées de l'Algérie (Touazi et Laborde, 2004 ; Meddour, 2010 ; Meddi et Toumi, 2013). Selon Chaumont et Paquin (1971) *in* Meddour (2010), la hauteur des précipitations peut dépasser les 2 000 mm sur les pics les plus élevés. D'après Touazi et Laborde (2004), le massif reçoit un total pluviométrique annuel de l'ordre de 1 500 à 2 000 mm. Abdesselam (1995) *in* Messaoudène *et al.* (2004), Derridj (1990) et Meddi et Toumi (2013) avancent, quant à eux, une tranche pluviométrique annuelle entre 1 200 mm et 1 500 mm.

D'après Benmouffok (1994), au niveau des sites de la partie méridionale, Djamaa Tighrifine, Lfidh Mohand Ouali et Tigounatine, les précipitations, très capricieuses d'une année à l'autre, sont de l'ordre de 800 à 1 500 mm. À Tala Guilef (Djurdjura septentrional), où est localisé le site Refuge Amirouche, Derridj (1990)

et Krouchi (2010) avancent les hauteurs de précipitations de 1 600 et 1 652 mm par an respectivement, pour une extrapolation à une altitude 1 650 m.

Le régime pluviométrique saisonnier de notre aire d'étude est du type HP AE (Derridj, 1990 ; Krouchi, 2010 ; Meddour, 2010).

La neige est souvent présente dans le Djurdjura. Seltzer (1946) *in* Meddour (2010) rapporte une moyenne d'enneigement de 28 jours par an à seulement 1 100 m d'altitude. Quézel (1957) *in* Benmouffok (1994) note une épaisseur de 2 à 4 m en versant nord. Benmouffok (1994) signale 15 à 20 jours de neige par an, sur une épaisseur de 0,3 à 2 m dans les sites élevés et de congères. Par ailleurs, Abdesselam (1995) *in* Krouchi (2010) rapporte que la neige tombe sur le massif du Djurdjura d'octobre à mai, avec une moyenne de 32 jours de chute par an, et elle persiste sur les sommets durant quatre mois.

2.3.5.2. Températures

D'après Meddour (2010), la température moyenne annuelle de notre aire d'étude est d'environ 12 °C. La température moyenne minimale du mois le plus froid est relevée en janvier. Elle est d'environ 2 °C. Le mois le plus chaud est août. Sa température moyenne maximale est d'environ 25 °C au niveau de la partie méridionale (Tikjda) et 26 °C dans la partie septentrionale (Tala Guilef). Des températures différentes sont rapportées par Benmouffok (1994) pour la zone de Tikjda. L'auteur note que la moyenne annuelle des températures avoisine les 15 °C. Les minima sont relevés entre décembre et janvier avec des températures comprises entre 0 et 5 °C. Les maxima sont observés entre juillet et août avec des températures allant de 21 à 24 °C.

2.3.5.3. Synthèse climatique

Nos sites couvrent une zone marquée par un climat méditerranéen avec une saison estivale sèche et chaude. D'après Derridj (1990) et Krouchi (2010), la zone de Tala Guilef est caractérisée par une période sèche de deux mois, de juillet à août. Dans la partie sud du Djurdjura, cette période est plus longue. Elle est de trois mois, et s'étale de juin à août (Benmouffok, 1994).

Selon Derridj (1990) et Krouchi (2010), Tala Guilef se situe dans l'étage bioclimatique perhumide à variante fraîche. Par contre, Meddour (2010) note que cette zone est caractérisée par un bioclimat humide à hiver frais. Le même constat est relevé pour la zone de Tikjda pour laquelle le bioclimat est perhumide à hiver frais selon Messaoudène *et al.* (2004) et Meddour (2010) et humide à hiver frais d'après Benmouffok (1994).

2.3.6. Végétation

Les sites échantillonnés se localisent dans des peuplements plus ou moins purs. La structure de la végétation est plus développée que celle de la région des Aurès. La strate arborée est dominante et essentiellement composée de grands cèdres, dont la plupart des arbres âgés sont fourchus près de la base, auxquels se joignent quelques rares pieds de chêne vert. Refuge Amirouche est situé dans la cédraie la plus âgée de notre aire d'étude. La strate arborescente de ce site est marquée par une forte présence du cytise triflore (*Cytisus triflorus*) (Quézel et Santa, 1962, 1963). Les sites de la partie méridionale présentent quant à eux une strate arborescente relativement moins fournie, occupée principalement par le chêne vert et le genévrier oxycèdre. La strate herbacée est fortement dégradée. Elle est très faiblement occupée à Lfidh Mohand Ouali, Djamaa Tighrifine et Refuge Amirouche qui sont des peuplements relativement denses. À Tigounatine, peuplement clair, elle n'est relativement développée que dans les grandes trouées, occupées par un bon nombre d'espèces héliophiles et xérophiles à l'image de l'asphodèle (*Asphodelus microcarpus*), du diss (*Ampelodesma mauritanicum*) et de l'astragale (*Astragalus armatus ssp. numidicus*) (Quézel et Santa, 1962, 1963).

Une bonne régénération du cèdre de l'Atlas a été observée au niveau de tous les peuplements sondés. Néanmoins, comme dans le cas de la région des Aurès, elle est fortement compromise par le surpâturage. À cela se rajoute la menace permanente que présente la fréquence des incendies de forêt dans le massif.

2.4. Conclusion

Nos aires d'étude sont situées en zones montagneuses de hautes altitudes, sur des substrats différents mais favorables au développement du cèdre de l'Atlas. Ces deux régions du nord algérien sont caractérisées par un climat méditerranéen contrasté. La région de Kabylie du Djurdjura est bien arrosée et bénéficie de l'effet adoucissant de la mer Méditerranée, située à seulement quelques kilomètres à vol d'oiseau. La région des Aurès est quant à elle moins arrosée et son écart thermique ainsi que sa période sèche sont plus importants. En outre, sa situation aux portes du Sahara l'expose directement au sirocco. Ainsi, dans la région de Kabylie, le cèdre de l'Atlas est présent aussi bien sur les versants nord que sud, alors que dans la région des Aurès l'espèce n'est bien développée que sur le versant nord. Par ailleurs, il y a lieu de noter que même sur cette exposition favorable, le cèdre de l'Atlas a enregistré des taux de dépérissement très élevés dans la région des Aurès au cours des dernières années, tandis que ce phénomène n'a eu qu'une incidence mineure au niveau des cédraies de Kabylie.

Le choix de ces deux régions d'étude est principalement motivé par ce contraste climatique et son éventuel impact sur la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique.

Chapitre III
Analyse et reconstruction climatique

Chapitre III

Analyse et reconstruction climatique

3.1. Introduction

L'eau est devenue l'une des ressources naturelles les plus stratégiques de la région méditerranéenne. Sa rareté affecte l'agriculture pluviale ainsi que tout autre secteur dépendant des ressources en eau. L'Algérie se situe, à l'instar des pays méditerranéens et africains touchés par le stress hydrique, dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques (PNUD, 2009). Les ressources en eau sont limitées, vulnérables et inégalement réparties dans l'espace et dans le temps (Hadibi *et al.*, 2009). Cette situation s'est aggravée ces dernières années par une sécheresse qui a touché l'ensemble du territoire national, et qui a montré combien il était nécessaire d'accorder la plus grande attention à cette ressource (Remini, 2010). Dans les années à venir, notre pays risque de faire face à une crise gravissime liée à l'insuffisance de la ressource en eau et au coût de plus en plus élevé de sa mobilisation (Loucif Seiad, 2003).

La gestion de la ressource en eau est un enjeu majeur du développement durable. La planification stratégique et efficace de l'eau repose, entre autres, sur des études climatiques impliquant des approches scientifiques à long terme. Cependant, ces études sont principalement confrontées au manque de données climatiques instrumentales. En Algérie, comme dans la plupart des pays de l'Afrique du Nord, les séries de données météorologiques sont souvent courtes ou lacunaires et ne sont pas adéquates pour l'étude de la variabilité climatique à long terme.

Grâce à la dendroclimatologie, les séries de données climatiques peuvent être sensiblement prolongées en utilisant des données de substitution obtenues à partir de cernes de croissance des arbres (Fritts, 1976). Les résultats issus de ces études fournissent des éléments précieux permettant d'estimer la fréquence et l'intensité des anomalies climatiques à long terme et anticiper la production de tels événements dans le futur. L'historique de l'utilisation des cernes de croissance en climatologie est très riche. Cependant, la plupart des études ayant trait à la reconstruction climatique a été réalisée en Amérique du Nord et en Europe de

l'Ouest. Par ailleurs, malgré le statut confirmé du bassin méditerranéen parmi les *hot-spots* mondiaux du changement climatique (Giorgi, 2006), les études dendroclimatiques qui lui sont consacrées restent insuffisantes, notamment au niveau de la rive sud. En Algérie, les publications traitant de la reconstruction dendroclimatique sont très rares. À notre connaissance elles se limitent aux seuls travaux de Touchan *et al.* (2008a, 2010) et de Kherchouche *et al.* (2012, 2013).

La présente étude a trait à la reconstruction des précipitations à partir de séries dendrochronologiques de quelques cédraies des régions des Aurès et de Kabylie. L'objectif principal de cette recherche est d'étudier les tendances d'évolution des précipitations à long terme au niveau des deux régions d'étude. Les précipitations reconstruites ont été utilisées pour l'analyse de la variabilité climatique passée, en mettant l'accent sur les épisodes extrêmes identifiés. Vu les considérations suscitées sur le statut de la ressource en eau en Algérie, une attention particulière a été accordée à l'analyse de la fréquence et de la sévérité de la sécheresse à long terme. Ainsi, les épisodes de sécheresse récurrents identifiés sur les deux reconstructions permettront de savoir si les deux régions d'étude ont été affectées de la même façon au cours du temps.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche vont enrichir l'historique des études dendrochronologiques en Algérie et en Afrique du Nord. Il s'agit de mettre à la disposition des acteurs de la gestion des ressources naturelles des éléments alternatifs efficaces pour une planification dans le cadre du développement durable permettant de faire face au changement climatique actuel et futur.

3.2. Matériel et méthodes

3.2.1. Échantillonnage

Trois campagnes d'échantillonnage ont été effectuées dans le cadre de cette étude : deux en 2010 (fin mai et fin septembre) et une troisième en 2012 (de fin mai au début juin). La collecte d'échantillons s'est basée sur un nombre minimum de 20 arbres sains par site, ne présentant aucune cicatrice, et comptant un nombre de cernes suffisant pour permettre l'interdatation (50 minimum), critères utilisés par

Touchan *et al.* (2008a, 2010) pour la même espèce au niveau des mêmes régions d'étude.

La taille de l'échantillon, nombre d'arbres carottés par site, au niveau des cédraies des Aurès est de 20 arbres à Thniet Zemroune et Tuggurt, et de 33 et 43 arbres respectivement à Ichmoul et Guetiane. Pour la Kabylie du Djurdjura, 20 arbres ont été sondés à Refuge Amirouche et 21 à Lfidh Mohand Ouali, Djamaa Tighrifine et Tigounatine (tableau 3.1).

Tableau 3.1. Nombre d'arbres sondés lors des différentes campagnes d'échantillonnage au niveau des deux régions d'étude.

Région	Code du site	Date d'échantillonnage	Nombre d'arbres sondés
Aurès	THZ	2012	20
	ICH	2010-2012	33
	TUG	2010	20
	GUE	2010-2012	43
Kabylie	LMO	2012	21
	DJT	2012	21
	TIG	2012	21
	REA	2012	20

Les informations notées lors du travail de terrain sont mentionnées sur une fiche élaborée à cet effet (annexe 3.1). Dans la plupart des cas, les sujets sélectionnés ont été carottés à cœur à une hauteur d'environ 1,30 m là où le tronc est plus ou moins droit et où les cernes présentent moins de risques de déformation (Delwaide et Filion, 2010). Deux carottes (A et B) par arbre ont été prélevées à l'aide d'une tarière de Pressler sur les positions 90 et 270 degrés par rapport à l'origine (0°) située sur la partie du tronc faisant face à la pente descendante. Dans quelques rares situations de conditions extrêmes, notamment sur pentes très raides, le carottage s'est limité au prélèvement d'une seule carotte par arbre. Aussi, quand seule une partie d'une carotte a pu être extraite, une troisième était prélevée.

3.2.2. Préparation des échantillons

Afin d'éviter les craquelures dans les échantillons, ces derniers ont été laissés sécher graduellement à l'air libre. Les carottes présentant des torsions causées lors

du sondage à la tarière de Pressler ou du séchage ont été redressées sur un jet de vapeur d'eau. Ensuite, les échantillons ont été montés sur des supports en bois rainurés et poncés afin d'améliorer la lisibilité des cernes annuels de croissance, notamment des cernes fins (fig. 3.1). Le ponçage a été effectué avec du papier à sabler, en commençant par un papier grossier, puis graduellement avec des papiers de plus en plus fins (Yamaguchi et Brunstein, 1991).



Figure 3.1. Surface poncée d'une carotte après montage sur un support en bois rainuré (échantillon TIG41B).

3.2.3. Interdatation et établissement des chronologies maîtresses

Connaissant la date de formation du dernier cerne sous l'écorce d'un arbre vivant, la datation des carottes s'est reposée sur le simple comptage à partir de ce cerne en direction de la moelle.

L'interdatation (*crossdating*) est une méthode essentielle permettant de s'assurer du bon calage chronologique des séries élémentaires (Lebourgeois et Mérian, 2012). Elle constitue le meilleur moyen de vérifier l'agencement synchrone des séries chronologiques afin de corriger d'éventuelles erreurs de datation et d'assigner à chaque cerne de croissance l'année exacte de sa formation (Douglass, 1939, 1946 ; Fritts, 1976 ; Grissino-Mayer, 2001a).

Les chronologies de référence ont été dans un premier temps établies, avant de mesurer les largeurs des cernes, avec une interdatation visuelle par la méthode de représentation schématique (*skeleton plot*) reposant 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).

La mesure des largeurs des cernes annuels de croissance a été effectuée de la moelle vers l'écorce avec une précision de l'ordre de 0,001 mm à l'aide d'un micromètre Velmex associé à un enregistreur automatique type rwmeas-Matlab.

Cette opération a été réalisée en prenant le soin de bien orienter l'échantillon de façon à ce que l'axe de mesure soit parfaitement perpendiculaire à la limite des cernes (Delwaide et Fillion, 2010).

Le programme COFECHA (Holmes, 1983) a été utilisé pour le contrôle statistique de la qualité de l'interdatation. COFECHA vérifie la fiabilité de l'interdatation en corrélant les segments successifs d'une série élémentaire donnée avec une chronologie de référence issue des séries élémentaires restantes. Vu la longueur de nos séries, 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 (ou cernes manquants) par série chronologique (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). COFECHA étant un outil statistique d'aide à la décision, les modifications ne concernent pas automatiquement tous les problèmes de datation signalés. Une modification ne doit être apportée qu'après vérification et confirmation d'une erreur réelle sur le bois.

Le nombre et la fréquence en cernes absents ont été utilisés dans la caractérisation des séries chronologiques. Dans la présente étude, la fréquence en cernes absents fait référence au nombre d'arbres avec cernes absents par rapport au nombre d'arbres total. Le carottage n'étant pas une méthode d'échantillonnage permettant de s'assurer qu'un anneau de croissance est totalement absent, dans cette étude le cerne absent sur un arbre fait plutôt référence à un cerne manquant dans au moins une carotte à la hauteur du sondage.

Les séries interdatées ont été ajustées pour minimiser les effets et tendances non liés à la variation climatique (Cook, 1985). Les signaux d'origine autre que climatique contenus dans les séries brutes sont dus, entre autres, à l'âge de l'arbre, à la compétition et à d'éventuelles perturbations (Fritts, 1976). La standardisation des chronologies a été effectuée avec le programme ARSTAN (Cook, 1985 ; Cook et Holmes, 1999) en utilisant la fonction spline cubique de lissage avec une fenêtre

définie à 67 % de la longueur de la série (Cook et Briffa, 1990). Une fois la courbe de croissance théorique calculée, les indices de croissance ont été obtenus par division de chaque valeur d'épaisseur de cerne sur la valeur correspondante sur la courbe de croissance théorique. Cette procédure transforme les mesures de largeurs de cernes en indices de croissance de dimension uniforme indépendamment des différences d'âge et de croissance entre les arbres, aboutissant ainsi à des chronologies caractérisées par une variabilité relativement homogène dans le temps, avec une moyenne de l'ordre de un (Fritts, 1976). Enfin, un préblanchiment des séries a été appliqué afin de retirer l'autocorrélation résiduelle dans les séries détendancées. Le modèle autorégressif utilisé s'est basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC, *Akaike information criterion*) le plus petit.

Les principales statistiques utilisées dans la caractérisation du signal contenu dans les chronologies sont : la sensibilité moyenne, l'autocorrélation d'ordre 1, l'intercorrélation moyenne, la variance du premier vecteur propre et le signal exprimé dans la population ou EPS (*expressed population signal*).

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

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 t (Lebourgeois et Mérian, 2012).

L'intercorrélation des séries est exprimée par le coefficient de corrélation de Pearson entre les séries individuelles au niveau de chaque site. Cette statistique est considérée comme le rapport signal sur bruit au sein de la chronologie maîtresse, donc un indicateur de la qualité de la transmission d'une information (Foster et Brooks 2001).

Le premier vecteur propre exprime le plus fort pourcentage de la variance totale d'un nuage de points. Les séries étant standardisées, la variance du premier

vecteur propre reflète la qualité du signal climatique contenu dans les cernes de croissance.

L'EPS constitue un très bon paramètre pour quantifier la robustesse des chronologies utilisées dans la reconstruction climatique. La longueur des chronologies finales 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).

3.2.4. Données climatiques

Le déterminisme climatique des variations interannuelles de croissance a été testé au préalable sur différentes séries de données climatiques mensuelles instrumentales (températures et précipitations) provenant de plusieurs stations météorologiques, ainsi que sur de multiples combinaisons de la base de données climatiques du CRU (*Climatic Research Unit*). Les données instrumentales des stations météorologiques de Batna et de Tizi Ouzou ont été les seules à générer des corrélations intéressantes pour une étude dendroclimatique. Ainsi, uniquement les données de ces dernières stations ont été retenues dans le cadre de cette étude (annexes 3.2, 3.3, 3.4 et 3.5).

La station météorologique de Batna se positionne au milieu des quatre sites d'étude de la région des Aurès, aux coordonnées géographiques 35,55° nord et 6,18° est, à une altitude de 1 050 m. La donnée climatique obtenue de cette station s'étale de 1930 à 2009 pour les précipitations et de 1972 à 2009 pour les températures. La station météorologique de Tizi Ouzou est quant à elle située à l'extérieur de la zone d'étude de la région de Kabylie. Elle est localisée aux coordonnées géographiques 36,70° nord et 4,05° est et une altitude de 195 m. Les séries de données climatiques obtenues de cette station sont relativement courtes, notamment pour les températures. La série des précipitations couvre la période 1982-2011, tandis que celle des températures ne s'étale que de 1990 à 2011.

3.2.5. Analyse du signal climatique

Une analyse en composantes principales a été appliquée aux quatre chronologies résiduelles de chaque région d'étude. Les scores factoriels des

composantes significatives, représentant la plus haute variance commune de la croissance des quatre chronologies maîtresses, sont utilisés dans l'analyse du signal climatique, puis, ultérieurement, dans la reconstruction des précipitations.

Le signal climatique contenu dans les cernes annuels de croissance a été évalué au moyen de fonctions de réponse. La fonction de réponse est une méthode descriptive qui permet de déterminer quels paramètres climatiques influencent au premier chef la croissance radiale et quelle est la nature et la force de la relation entre le climat et la croissance radiale. Plus les milieux sont contraignants, plus les relations cernes-climat seront significatives et stables. Lorsque les conditions climatiques et stationnelles sont très favorables à la croissance, cette dernière ne variera pas beaucoup d'une année à l'autre. La signification des fonctions de réponse sera alors faible et l'interprétation des relations cernes-climat difficile, voire hasardeuse (Guiot et Nicault, 2010). Les fonctions de réponse utilisées dans cette étude sont de type *bootstrapped* (Guiot, 1991). Elles permettent de tester simultanément les coefficients de régression et la stabilité de la fonction de réponse. Les régresseurs, variables indépendantes, sont les données climatiques (températures moyennes mensuelles et totaux mensuels des précipitations), tandis que la variable dépendante est la donnée dendrochronologique représentée par les scores factoriels des composantes principales significatives (Touchan *et al.*, 2014).

Le programme Seascorr (Meko *et al.*, 2011) a été utilisé pour le calcul des fonctions de réponses pour la région des Aurès. L'exécution de ce programme exige l'entrée de trois fichiers de données. Les fichiers d'entrée utilisés dans cette analyse sont les séries des précipitations mensuelles et des températures moyennes mensuelles (variables indépendantes) et les scores factoriels de la première composante, CP1, (variables dépendante). L'analyse a été effectuée sur la période commune que couvrent les trois fichiers d'entrée (1972-2009). Pour une bonne estimation de la stabilité de la fonction de réponse, Seascorr calcule les corrélations entre les variables climatiques et la CP1 pour la période totale d'analyse ainsi que pour deux sous-périodes, en divisant cette dernière en deux jeux de données. Les résultats sont donnés pour les périodes suivantes : 1974-2009 (période totale), 1974-1991 (première sous-période) et 1992-2009 (deuxième sous-période).

Pour la région de Kabylie, la série des températures moyennes mensuelles est courte pour constituer un fichier d'entrée pour le programme Seascorr. L'analyse a été réalisée sous DendroClim2002 (Biondi et Waikul, 2004) avec seulement deux fichiers d'entrée : les précipitations mensuelles et les scores factoriels de la CP1 pour la période 1982-2011.

3.2.6. Reconstruction climatique des précipitations

La fonction de transfert a été utilisée pour reconstruire les précipitations identifiées par les fonctions de réponse comme élément principal influençant la croissance radiale. Le principe de base est le même que celui de la fonction de réponse, sauf que dans la régression linéaire de la fonction de transfert, le paramètre climatique (précipitations) devient la variable dépendante et la CP1 la variable indépendante (Fritts, 1976).

La longueur de la série des précipitations utilisée pour la région des Aurès (79 ans) permet l'application d'une approche avec fractionnement de la donnée pour tester la stabilité du modèle de reconstruction (Touchan *et al.*, 2005a, 2005b, 2008a, 2008b, 2014 ; Henderson, 2006). Le modèle a été établi après transformation logarithmique de la série des précipitations, procédure efficace pour la reconstruction climatique dans les milieux où les précipitations sont très irrégulières (Touchan *et al.*, 1999). Après transformation logarithmique, cette série a été divisée en deux jeux de données indépendants, 1931-1970 et 1971-2009, où chaque jeu a été utilisé comme période de calibration puis de vérification. Les coefficients de détermination de calibration et de vérification, la réduction proportionnelle de l'erreur (RE) et l'estimation par validation croisée de l'erreur de prédiction, PRESS (*predicted residual sum of squares*), sont les statistiques utilisées pour valider le modèle statistique de reconstruction. La méthode PRESS est une procédure dans laquelle le modèle est validé itérativement par des opérations de calibration et validation, en omettant à chaque fois une observation du jeu de données de calibration, puis en utilisant le modèle établi pour prédire l'observation omise (Fritts *et al.*, 1990). Le modèle final de reconstruction des précipitations est basé sur la

période de calibration totale (1931-2009). L'analyse des précipitations reconstruites repose sur les valeurs reconverties avec la fonction antilogarithme.

La série des précipitations de la station météorologique de Tizi Ouzou n'est pas suffisamment longue pour appliquer l'approche avec fractionnement de la donnée. Ainsi, le modèle de reconstruction pour la région de Kabylie a été directement établi sur la période de calibration totale 1983-2011. La stabilité du modèle et son pouvoir prédictif ont été approchés à travers le coefficient de détermination prédit par la procédure PRESS.

Pour les deux régions d'étude, l'identification des événements extrêmes a été fixée à moins de 80 % et à plus de 120 % de la moyenne des précipitations observées pour les seuils de sécheresse et d'humidité respectivement. La sévérité de la sécheresse a été calculée puis présentée schématiquement sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année. Elle a été définie, pour chaque année sèche, comme le déficit par rapport au seuil de la sécheresse (Touchan *et al.*, 2003).

3.3. Résultats

3.3.1. Développement des séries dendrochronologiques

3.3.1.1. Chronologies de la région des Aurès

Les principales caractéristiques des chronologies établies pour la région des Aurès sont consignées dans le tableau 3.2. La série la plus longue a été obtenue à Thniet Zemroune. Elle couvre une période de 668 années s'étalant de 1344 à 2011. La série la plus courte a été établie au niveau du site de Tuggurt. Elle couvre une période de 278 années allant de 1732 à 2009.

Tableau 3.2. Caractéristiques des chronologies de la région des Aurès (COFECHA).

Code du site	Période	Nombre d'années	Arbres datés	Carottes datées	Cernes absents	Segments avec problèmes
THZ	1344-2011	668	20/20	36/40	123	12
ICH	1401-2011	611	29/33	54/58	113	9
TUG	1732-2009	278	20/20	38/40	42	5
GUE	1440-2011	572	40/43	76/80	36	20

Seuls 7 arbres sur 116 n'ont pas pu être datés : trois à Guetiane et quatre à Ichmoul. Toutefois, la datation n'a été réussie que pour une seule carotte sur plusieurs arbres : quatre arbres pour Thniet Zemroune, Ichmoul et Guetiane et deux pour Tuggurt.

En tenant compte de la longueur des séries, les différentes chronologies affichent un nombre de segments avec problèmes assez faible. La chronologie de Guetiane affiche 20 segments avec de possibles erreurs. Cette statistique est nettement plus faible au niveau des autres cédraies (12, 9 et 5 respectivement à Thniet Zemroune, Ichmoul et Tuggurt).

Thniet Zemroune affiche un total de 123 cernes absents, soit 0,80 % du nombre total de cernes impliqués dans l'élaboration de la chronologie maîtresse. Les séries individuelles des cédraies d'Ichmoul et de Tuggurt ont enregistré 113 (0,73 %) et 42 (0,59 %) cernes absents respectivement. Enfin, malgré la longueur de la chronologie (572 ans), la cédraie de Guetiane n'a enregistré que 36 cernes absents, soit un taux de 0,19 % du nombre total de cernes datés.

Les années successives 2001 et 2002 se distinguent des autres années avec cernes absents. Ce sont, en effet, les seules années pour lesquelles toutes les chronologies maîtresses ont enregistré des cernes absents. Deux carottes (2 arbres) à Guetiane, 4 carottes (4 arbres) à Thniet Zemroune, 6 carottes (4 arbres) à Tuggurt et 28 carottes (17 arbres) à Ichmoul ont enregistré un cerne absent en 2001. Pour l'an 2002 le cerne est absent dans 18 carottes (14 arbres) à Thniet Zemroune, 26 carottes (17 arbres) à Tuggurt, 24 carottes (16 arbres) à Ichmoul et 30 carottes (19 arbres) à Guetiane. Le cerne est absent pour les deux années successives 2001 et 2002 dans 2 carottes (2 arbres) à Guetiane, 4 carottes (4 arbres) à Thniet Zemroune, 3 carottes (4 arbres) à Tuggurt et 13 carottes (18 arbres) à Ichmoul. La liste des cernes absents par arbre est présentée dans l'annexe 3.6.

Les fréquences en cernes absents par arbre sont présentées dans la figure 3.2. Le nombre et la fréquence des cernes absents sont remarquables à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle. Les fréquences les plus élevées ont été enregistrées en 2001 (0,59 pour Ichmoul) et 2002 (0,85, 0,74, 0,55 et 0,48 pour Tuggurt, Thniet Zemroune, Ichmoul, et Guetiane respectivement).

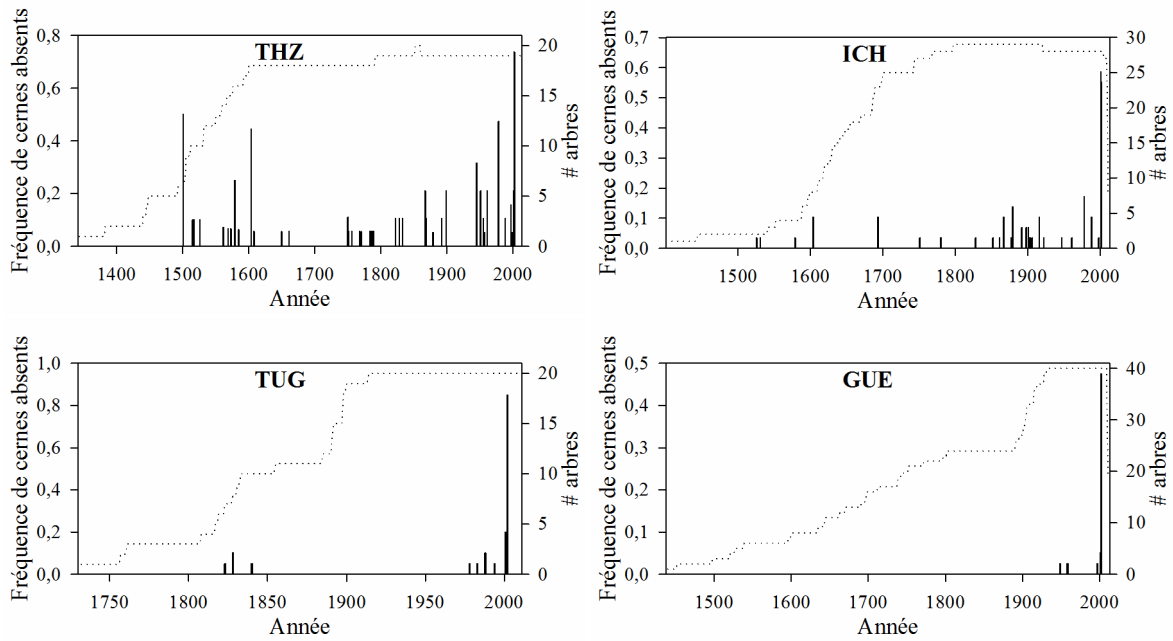


Figure 3.2. Fréquences en cernes absents (barres verticales) pour les quatre sites d'étude de la région des Aurès. La ligne en pointillé représente le nombre d'arbres datés.

Les coefficients de sensibilité moyenne sont appréciables pour les trois chronologies générées par le programme ARSTAN, avec des coefficients légèrement supérieurs pour les chronologies résiduelles (0,32 pour Thniet Zemroune, 0,30 pour Ichmoul et Tuggurt et 0,18 pour Guetiane). Aussi, les chronologies résiduelles présentent les coefficients d'autocorrélations d'ordre 1 les plus faibles, avec des valeurs presque nulles (tableau 3.3).

Les corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre des séries ajustées et résidus des séries pour l'intervalle commun entre les séries individuelles pour chacune des chronologies sont résumées dans le tableau 3.4. Les périodes communes des quatre sites d'études sont assez longues. Elles varient entre 106 et 360 années pour Tuggurt et Thniet Zemroune respectivement. Les corrélations moyennes et la variance exprimée par le premier vecteur propre sont plus élevées pour les chronologies résiduelles : la corrélation moyenne inter-arbre varie entre 0,41 (Guetiane) et 0,66 (Tuggurt) et la variance exprimée par le premier vecteur propre varient entre 43,41 % (Guetiane) et 67,86 % (Tuggurt). Ce sont ces chronologies qui sont retenues pour la suite des analyses dans cette étude.

Tableau 3.3. Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN pour la région des Aurès (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = Arstan).

Chronologie	Indice de croissance moyen	Sensibilité moyenne	Écart type	Autocorrélation d'ordre 1
STD				
THZ	0,986	0,30	0,30	0,303
ICH	0,984	0,31	0,30	0,303
TUG	0,974	0,30	0,31	0,271
GUE	0,992	0,16	0,21	0,558
RES				
THZ	0,991	0,32	0,27	0,003
ICH	0,988	0,32	0,27	0,001
TUG	0,984	0,30	0,27	-0,014
GUE	0,993	0,18	0,16	-0,005
ARS				
THZ	0,983	0,30	0,29	0,219
ICH	0,984	0,31	0,29	0,228
TUG	0,981	0,29	0,28	0,130
GUE	0,992	0,16	0,18	0,406

Tableau 3.4. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) des séries ajustées (Aju.) et résidus des séries (Res.) pour l'intervalle commun des chronologies de la région des Aurès.

Chronologie		Corrélation moyenne		Période commune	Nombre d'années	Nombre d'arbres	Variance du 1 ^{er} VP (%)
		Inter-arbre	Carotte vs moyenne				
THZ	Aju.	0,40	0,65	1651-2010	360	14	44,27
	Res.	0,57	0,76				60,13
ICH	Aju.	0,43	0,67	1703-2009	307	24	45,83
	Res.	0,59	0,76				60,93
TUG	Aju.	0,53	0,73	1903-2008	106	19	54,83
	Res.	0,66	0,81				67,86
GUE	Aju.	0,25	0,50	1769-2009	241	21	28,85
	Res.	0,41	0,63				43,41

Les caractéristiques des chronologies résiduelles basées sur le seuil d'EPS de 0,85 sont consignées dans le tableau 3.5. Les chronologies résiduelles retenues pour l'analyse dendrochronologique sont assez longues. La plus courte chronologie est obtenue à Tuggurt. Elle couvre une période de 249 années allant de 1761 à 2009. La plus longue chronologie est celle de Thniet Zemroune. Elle couvre une période de

567 années s'étalant de 1445 à 2011. Le nombre d'arbres minimum nécessaires pour atteindre la valeur du signal exprimé dans la population de 0,85 est très faible pour les cédraies de Thniet Zemroune, Ichmoul et Tuggurt (cinq, quatre et trois arbres respectivement). Par contre, il faut un minimum de neuf arbres pour atteindre cette valeur d'EPS au niveau de la cédraie de Guetiane. La taille moyenne du segment de l'échantillon pour les quatre chronologies maîtresses est importante. Elle varie entre 152 et 386 années pour Tuggurt et Thniet Zemroune respectivement.

Tableau 3.5. Longueurs des chronologies résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 pour la région des Aurès.

Site	Période	Taille moyenne du segment de l'échantillon (année)	EPS > 0,85	
			Période	# arbres
THZ	1347-2011	386	1445-2011	5
ICH	1404-2011	353	1552-2011	4
TUG	1736-2009	152	1761-2009	3
GUE	1442-2011	243	1633-2011	9

3.3.1.2. Chronologies de la région de Kabylie

Les caractéristiques des chronologies de la région de Kabylie sont consignées dans le tableau 3.6. La chronologie maîtresse de Tigounatine est la plus longue. Elle couvre une période de 421 années s'étalant de 1591 à 2011. La série la plus courte a été établie pour le site de Lfidh Mohand Ouali. Elle couvre une période de 256 années de 1756 à 2011.

Tableau 3.6. Caractéristiques des chronologies de la région de Kabylie.

Code du site	Période	Nombre d'années	Arbres datés	Carottes datées	Cernes absents	Segments avec problèmes
LMO	1756-2011	256	21/21	40/42	0	12
DJT	1635-2011	377	21/21	38/42	4	8
TIG	1591-2011	421	20/21	39/43	37	17
REA	1647-2011	365	20/20	38/40	3	22

Sur les 83 arbres sondés, un seul n'a pas pu être daté (à Tigounatine). Par ailleurs, seulement une carotte a pu être datée sur 12 arbres : quatre arbres à Djamaa

Tighrifine et Tigounatine et deux arbres à Lfidh Mohand Ouali et Refuge Amirouche.

Les quatre chronologies montrent un nombre de segments avec problèmes assez faible. Cette statistique varie entre 8 et 22 segments avec de possibles erreurs à Djamaa Tighrifine et Refuge Amirouche respectivement.

Aucun cerne absent n'a été identifié sur les séries individuelles de Lfidh Mohand Ouali. Deux années avec des cernes absents (1698 et 1817) ont été identifiées à Djamaa Tighrifine (trois carottes, deux arbres). À Refuge Amirouche, trois cernes absents (deux carottes, deux arbres) ont été identifiés sur trois années (1861, 1871 et 1958). Enfin, un maximum de 37 cernes absents (18 carottes, 13 arbres), soit 0,44 % du total de cernes datés, ont été identifiés sur 14 années à Tigounatine. Au niveau de ce dernier site, les cernes absents ont été identifiés dans 25 % des arbres en 1859, 1928 et 1939 et dans 45 % des arbres en 1858. Seule l'année 1858 a enregistré un cerne absent commun entre les quatre sites de la région de Kabylie (une carotte pour Djamaa Tighrifine et neuf carottes sur neuf arbres pour Tigounatine). Par ailleurs, trois années avec cernes absents communs entre les sites de nos deux régions d'étude ont été identifiés : 1969 (deux carottes sur deux arbres à Thniet Zemroune et une carotte à Refuge Amirouche) ; 1904 (Une carotte à Ichmoul et une autre à Tigounatine) et 1958 (Une carotte à Guetiane et une autre à Refuge Amirouche) (annexe 3.6).

Les principales statistiques issues de la standardisation des séries chronologiques sont consignées dans les tableaux 3.7, 3.8 et 3.9.

L'exploitation des résultats est meilleure pour les chronologies résiduelles. La sensibilité moyenne est relativement faible à Lfidh Mohand Ouali et Refuge Amirouche qui affichent des coefficients de sensibilité moyenne de l'ordre de 0,13 et 0,16 respectivement. Les sites de Djamaa Tighrifine et Tigounatine enregistrent un coefficient de sensibilité de 0,23. Par ailleurs, comme dans le cas de la région des Aurès, les valeurs du coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 sont presque nulles pour les chronologies résiduelles (tableau 3.7).

Tableau 3.7. Principales statistiques du fichier de sortie du programme ARSTAN pour la région de Kabylie (STD = standard ; RES = résiduelle ; ARS = Arstan).

Chronologie	Indice de croissance moyen	Sensibilité moyenne	Écart type	Autocorrélation d'ordre 1
STD				
LMO	0,9956	0,14	0,26	0,765
DJT	0,981	0,22	0,31	0,637
TIG	0,968	0,22	0,34	0,756
REA	0,980	0,17	0,24	0,593
RES				
LMO	1,001	0,13	0,13	0,058
DJT	0,998	0,23	0,19	0,009
TIG	0,992	0,23	0,20	-0,007
REA	0,995	0,16	0,15	-0,014
ARS				
LMO	1,004	0,14	0,19	0,549
DJT	0,988	0,22	0,24	0,365
TIG	0,984	0,21	0,34	0,737
REA	0,987	0,17	0,21	0,464

Les périodes communes des quatre sites de la région de Kabylie varient entre 87 et 166 années pour Lfidh Mohand Ouali et Tigounatine respectivement. Les chronologies résiduelles présentent les corrélations moyennes et la variance exprimée par le premier vecteur propre les plus élevées des trois chronologies générées par le programme ARSTAN : la corrélation moyenne inter-arbre varie entre 0,39 (Tigounatine) et 0,43 (Lfidh Mohand Ouali) et la variance exprimée par le premier vecteur propre varie entre 43 % (Tigounatine) et 46 % (Lfidh Mohand Ouali) (tableau 3.8).

Comme dans le cas de la région des Aurès, ce sont les chronologies résiduelles qui sont retenues pour les analyses ultérieures.

Le tableau 3.9 montre que les chronologies résiduelles de la région de Kabylie basées sur le seuil d'EPS de 0,85 sont moins longues que celles de la région des Aurès. Cela dit, toutes les chronologies maîtresses dépassent les 100 années.

Tableau 3.8. Corrélations moyennes et variances du premier vecteur propre (VP) des séries ajustées (Aju.) et résidus des séries (Res.) pour l'intervalle commun des chronologies de la région de Kabylie.

Chronologie		Corrélation moyenne		Période commune	Nombre d'années	Nombre d'arbres	Variance du 1 ^{er} VP (%)
		Inter-arbres	Carottes vs moyenne				
LMO	Aju.	0,25	0,52	1925-2011	87	17	30,18
	Res.	0,43	0,64				45,93
DJT	Aju.	0,25	0,52	1906-2011	106	12	31,35
	Res.	0,41	0,64				44,65
TIG	Aju.	0,31	0,58	1845-2010	166	14	35,18
	Res.	0,39	0,64				42,60
REA	Aju.	0,19	0,46	1899-2010	112	20	22,95
	Res.	0,41	0,64				44,05

La plus courte chronologie a été établie pour le site de Lfidh Mohand Ouali. Elle couvre une période de 114 années allant de 1898 à 2011. La plus longue chronologie a quant à elle été obtenue à Tigounatine. Elle couvre une période de 279 années s'étalant de 1733 à 2011. Le nombre d'arbres minimum nécessaires pour atteindre la valeur EPS de 0,85 est comparable entre les quatre sites (huit arbres à Lfidh Mohand Ouali et neuf arbres à Djamaa Tighrifine, Tigounatine et Refuge Amirouche) et similaire à celui mentionné pour la cédraie de Guetiane dans la région des Aurès (neuf arbres). La taille moyenne du segment de l'échantillon pour les chronologies de la région de Kabylie est aussi inférieure à celle enregistrée dans la région des Aurès. Elle varie entre 107 et 217 années, obtenues à Lfidh Mohand Ouali et Tigounatine respectivement.

Tableau 3.9. Longueurs des chronologies résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 pour la région de Kabylie.

Site	Période	Taille moyenne du segment de l'échantillon (année)	EPS > 0,85	
			Période	# arbres
LMO	1758-2011	107	1898-2011	8
DJT	1636-2011	137	1883-2011	9
TIG	1593-2011	217	1733-2011	9
REA	1649-2011	183	1810-2011	9

3.3.2. Analyse du signal climatique

3.3.2.1. Analyse du signal climatique pour la région des Aurès

La matrice des corrélations de l'analyse en composantes principales, appliquée aux quatre chronologies résiduelles de la région des Aurès pour la période commune 1761-2009, affiche des coefficients très hautement significatifs ($n = 249$, $p < 0,001$) (tableau 3.10). Le coefficient de corrélation de Pearson varie entre 0,43 (entre Thniet Zemroune et Guetiane) et 0,71 (entre Tuggurt et Ichmoul).

Tableau 3.10. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région des Aurès. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson et la valeur p ($n = 249$).

	THZ	ICH	GUE
ICH	0,67 0,000		
GUE	0,43 0,000	0,57 0,000	
TUG	0,49 0,000	0,71 0,000	0,60 0,000

Le graphique éboulis des valeurs propres et le test des bâtons brisés (fig. 3.3) montre que seule la première composante, traduisant 71,80 % de l'information disponible, est significative au seuil $\alpha = 0,05$. Les composantes 2, 3 et 4 présentent des variances de l'ordre de 16,29 %, 6,84 % et 5,07 % respectivement. Ainsi, une approche unifactorielle avec seulement les scores factoriels de la CP1, exprimant la variabilité commune de la croissance des quatre chronologies, est utilisée dans le calcul des fonctions de réponse et dans la reconstruction climatique.

Les principaux résultats du programme Seascorr, impliquant les scores factoriels de la CP1 des chronologies de la région des Aurès et 24 régresseurs climatiques mensuels (12 valeurs pour les données de précipitations et 12 valeurs pour les températures), sont présentés dans les figures 3.4 et 3.5 et tableaux 3.11 et 3.12 ainsi que les annexes 3.2, 3.3 et 3.4. En considérant les mois individuellement, les fonctions de réponses montrent que la précipitation du mois d'octobre de l'année $t-1$ est positivement et significativement corrélée avec la CP1 ($\alpha = 0,05$, $n = 38$). Aussi, mis à part le mois de septembre, les mois de l'année t affichent une

corrélation positive, avec des coefficients significatifs ($\alpha = 0,05$, $n = 38$) pour les mois de mars, mai et juin (fig. 3.4). Par ailleurs, la corrélation est d'autant plus élevée et plus significative en considérant les précipitations moyennes sur des périodes plus longues (fig. 3.4 et 3.5 et tableaux 3.11 et 3.12).

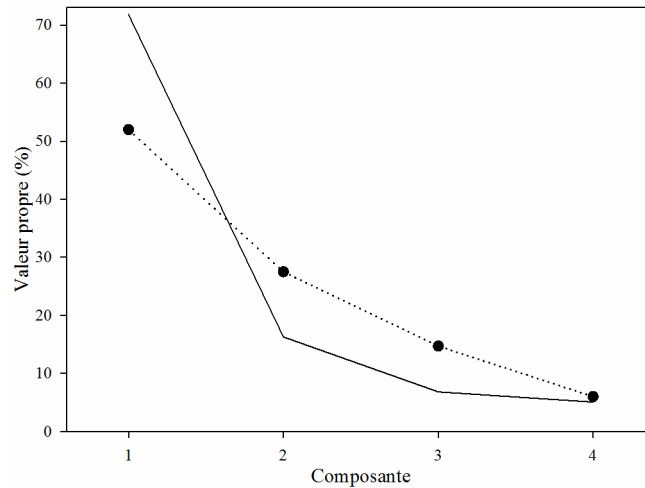


Figure 3.3. Graphique éboulis des valeurs propres (ligne continue) et test des bâtons brisés (ligne en pointillé) pour les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région des Aurès. Les composantes sont significatives lorsque la courbe des valeurs propres passe au-dessus de la courbe générée par la procédure des bâtons brisés.

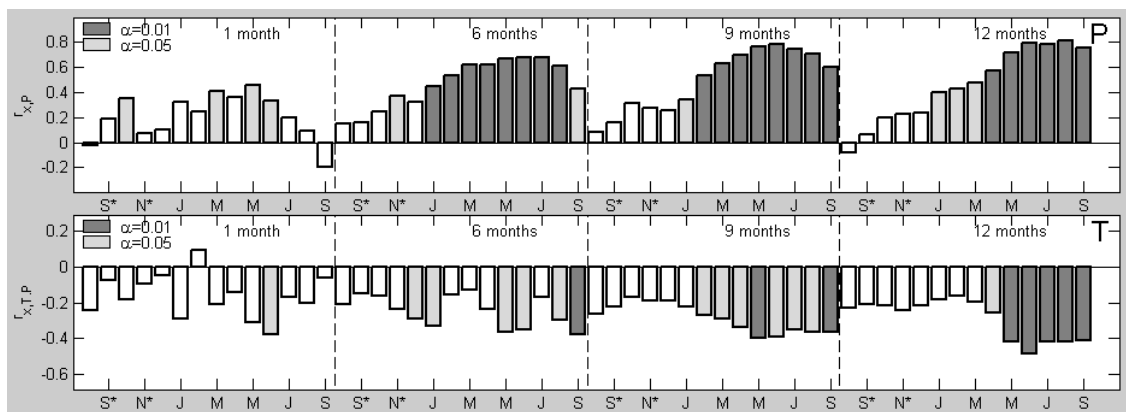


Figure 3.4. Corrélations entre la CP1 des chronologies de la région des Aurès et les variables climatiques saisonnières. En haut les corrélations avec la variable climatique primaire, les précipitations (P). En bas les corrélations avec la variable climatique secondaire, la température (T). L'astérisque (*) indique les mois de l'année t-1.

Dans le tableau 3.11 sont rapportées les plus hautes corrélations entre les précipitations et la CP1 pour les périodes de 1, 6, 9 et 12 mois. Les probabilités de non dépassement sont très élevées du fait que les corrélations observées sont supérieures à celles générées dans les 1 000 simulations.

Tableau 3.11. Périodes présentant les plus fortes corrélations entre la CP1 et les précipitations. r est le coefficient de corrélation de Pearson, * indique un seuil α de 0,05 et ** un seuil de 0,01.

Nombre de mois	Mois final	r	Probabilité de non dépassement
1	Mai	0,46	0,9876 *
6	Juin	0,68	0,9990 **
9	Juin	0,78	0,9990 **
12	Août	0,81	0,9990 **

Tableau 3.12. Stabilité temporelle de la corrélation entre la CP1 et les précipitations de la première à la deuxième sous-période d'analyse.

Mois	Corrélation ^a			Taille de l'échantillon ^b		Résultat du test ^c	
	Totale	1 ^{re} sous-période	2 ^e sous-période	N ₁	N ₂	ΔZ	p
Mai	0,46	0,60	0,35	18	18	0,3309	0,365
Jan-juin	0,68	0,72	0,64	18	18	0,1482	0,685
Oct*-juin	0,78	0,80	0,78	18	18	0,0647	0,859
Sep*-août	0,81	0,81	0,82	18	18	-0,0314	0,932

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

^a : Les corrélations linéaires de Pearson sont calculées pour la période totale (1974-2009), la première sous-période (1974-1991) et la deuxième sous-période (1992-2009).

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

^c : ΔZ est la différence entre les corrélations transformées des deux sous-périodes selon Panofsky et Brier (1968) et Snedecor et Cochran (1989) in Meko *et al.* (2011). La dernière colonne présente la valeur p pour tester l'hypothèse nulle indiquant que les échantillons de corrélations des deux sous-périodes proviennent de la même population. Une différence significative entre les corrélations des deux sous-périodes est indiquée par une faible valeur p (ex. $p < 0,05$).

Le tableau 3.12 montre que les corrélations sus-citées sont stables dans le temps. Aucune différence significative n'a été relevée entre les deux sous-périodes

d'analyses. Par ailleurs, la figure 3.5 montre que les relations entre les précipitations et la CPI sont plus ou moins linéaires, sans effet notable des valeurs extrêmes (observations aberrantes), notamment pour les périodes les plus longues.

L'analyse des fonctions de réponse sous Seascorr avec la température comme variable climatique primaire montre que la moyenne mensuelle des températures est négativement corrélée avec la CPI. Plusieurs mois de l'année t affichent une corrélation significative aux seuils $\alpha = 0,05$ et $\alpha = 0,01$ ($n = 38$) (annexe 3.7). Néanmoins, les résultats montrent que les corrélations observées sont inférieures à celles générées dans les 1 000 simulations par Seascorr, traduit par de faibles probabilités de non dépassement (annexe 3.8). Aussi, les différences entre les deux sous-périodes d'analyses sont élevées, voire même significatives pour les périodes de six et neuf mois, synonymes de l'instabilité de la corrélation dans le temps (annexe 3.9). Par ailleurs, tous les diagrammes de dispersions entre la CPI et la température (annexe 3.10) montrent des nuages de points très dispersés avec plusieurs observations aberrantes.

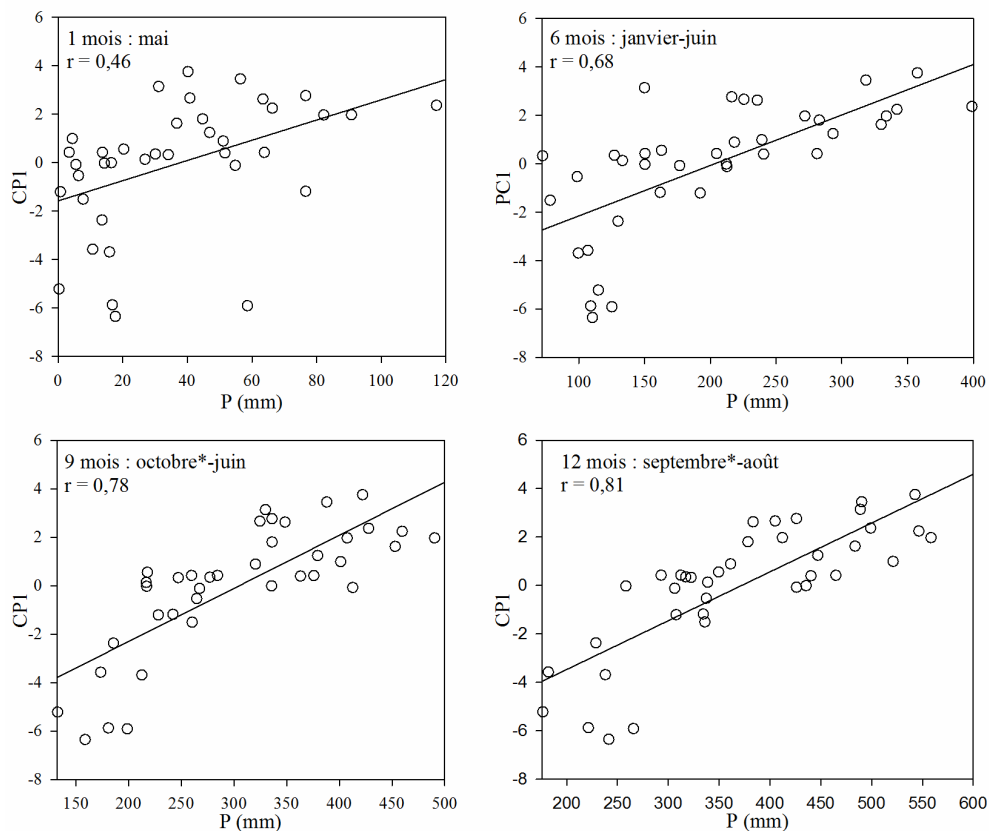


Figure 3.5. Diagrammes de dispersions entre la CPI et les précipitations (P) pour la région des Aurès.

En résumé la reconstruction n'est fiable que pour les précipitations. La reconstruction paraît tout à fait possible pour la période de 12 mois allant de septembre de l'année t-1 à août de l'année t. Cependant, par mesure de prudence, nous proposons une reconstruction pour la période de neuf mois allant d'octobre de l'année t-1 à juin de l'année t, pour laquelle la corrélation du mois de janvier est significative au seuil $\alpha = 0,05$ ($n = 38$) et celles des mois de février à juin sont significatives au seuil $\alpha = 0,01$ ($n = 38$) (fig. 3.4).

3.3.2.2. Analyse du signal climatique pour la région de Kabylie

La matrice des corrélations de l'analyse en composantes principales, appliquée aux quatre chronologies résiduelles de la région de Kabylie pour la période commune 1898-2011, affiche des coefficients très hautement significatifs ($n = 114$, $p < 0,001$), légèrement supérieurs à ceux obtenus pour la région des Aurès (tableau 3.13). Le coefficient de corrélation de Pearson varie entre 0,54 (entre Tigounatine et Refuge Amirouche) et 0,79 (entre Lfidh Mohand Ouali et Djamaa Tighrifine).

Tableau 3.13. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région de Kabylie. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson et la valeur p ($n = 114$).

	TIG	REA	DJT
REA	0,54 0,000		
DJT	0,73 0,000	0,66 0,000	
LMO	0,65 0,000	0,67 0,000	0,79 0,000

Le graphique éboulis des valeurs propres et le test des bâtons brisés pour la région de Kabylie (fig. 3.6) montre que seule la première composante, traduisant 75,56 % de l'information disponible, est significative au seuil $\alpha = 0,05$ ($n = 114$). Les composantes 2, 3 et 4 enregistrent des variances de l'ordre de 12,5 %, 7,62 % et 4,30 % respectivement. Comme dans le cas de la région des Aurès, seuls les scores factoriels de la CP1 sont utilisés dans le calcul des fonctions de réponse et dans la reconstruction climatique.

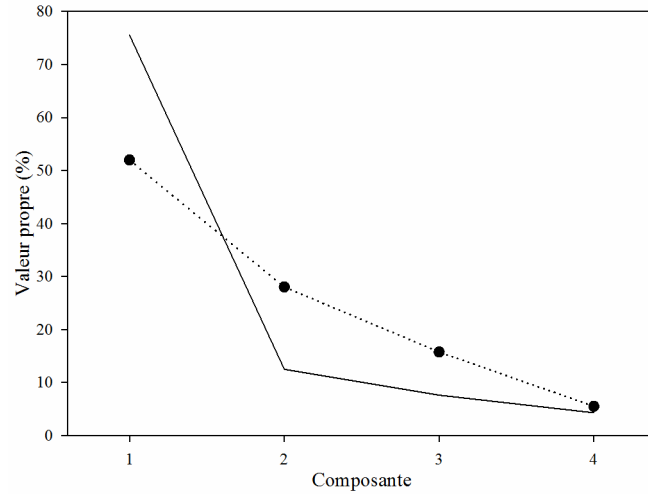


Figure 3.6. Graphique éboulis des valeurs propres (ligne continue) et test des bâtons brisés (ligne en pointillé) pour les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région de Kabylie. Les composantes sont significatives lorsque la courbe des valeurs propres passe au-dessus de la courbe générée par la procédure des bâtons brisés.

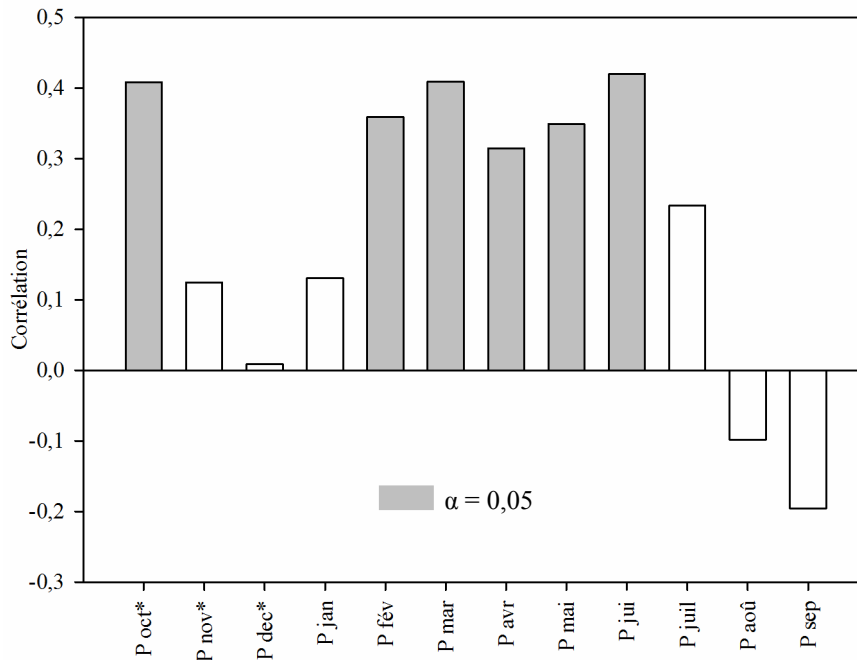


Figure 3.7. Corrélations entre les scores factoriels de la CP1 et les précipitations mensuelles (P) pour la région de Kabylie sur la période 1982-2011. L'astérisque (*) indique les mois de l'année t-1.

Les résultats de la fonction de réponse (DendroClim2002) montrent que la reconstruction des précipitations est possible pour la période de neuf mois allant d'octobre de l'année t-1 à juin de l'année t pour laquelle tous les mois sont positivement corrélés, dont six mois le sont significativement (fig. 3.7). La corrélation entre la CP1 et les précipitations s'avère positive et significative au seuil $\alpha = 0,05$ ($n = 30$) pour les mois d'octobre de l'année t-1 et ceux de février à juin de l'année t. Les corrélations des mois de novembre et décembre de l'année t-1 et de janvier et juillet de l'année t sont aussi positives (mais non significatives). Par contre, les mois d'août et de septembre de l'année t affichent des corrélations négatives non significatives.

3.3.3. Reconstruction climatique

3.3.3.1. Reconstruction des précipitations pour la région des Aurès

Les paramètres utilisés dans la procédure de validation du modèle statistique de reconstruction des précipitations pour la région des Aurès sont consignés dans le tableau 3.14. Les coefficients de calibration et de vérification, quantifiant respectivement la capacité descriptive et prédictive du modèle, sont très hautement significatifs ($p < 0,001$). Aussi, le paramètre réduction proportionnelle de l'erreur (RE) affiche une valeur positive indiquant la stabilité du modèle.

Tableau 3.14. Statistiques de calibration et validation du modèle de reconstruction par la méthode d'échantillon fractionné. Pour tous les coefficients de détermination $p < 0,001$.

Période de calibration	Période de vérification	r^2 ajusté de calibration	r^2 de vérification	RE
1931-1969	1970-2009	0,44	0,67	0,62
1970-2009	1931-1969	0,69	0,46	0,44

Le modèle linéaire de reconstruction final (fonction de transfert) est basé sur l'équation suivante :

$$\text{Log } P_{\text{oct*juj}} = 2,46 + 0,0496 * \text{CP1}$$

Où $P_{\text{oct}^*-\text{jui}}$ est le cumul moyen des précipitations d'octobre à juin sur la période 1931-2009, et CP1 la première composante principale (scores factoriels).

Les paramètres statistiques de ce modèle sont très appréciables. Le coefficient de détermination ajusté de calibration est très hautement significatif ($r^2 = 0,56$, $n = 79$, $p < 0,001$). Le critère de validation croisée, PRESS, prédit un coefficient de détermination très hautement significatif ($r^2 = 0,55$, $n = 79$, $p < 0,001$), légèrement inférieur au coefficient de détermination ajusté de calibration.

Les précipitations observées et estimées pour la période totale de calibration sont présentées sur la figure 3.8. Le coefficient de corrélation de Pearson entre les deux séries est de 0,76 ($n = 79$, $p < 0,001$). Ces dernières présentent une différence de hauteur moyenne des précipitations d'octobre à juin de l'ordre de 7 mm.

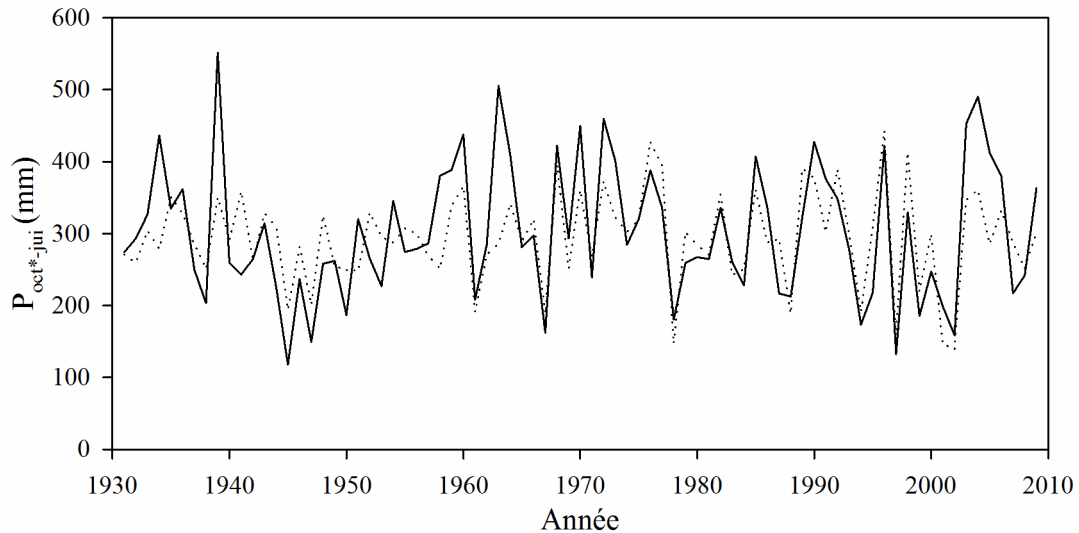


Figure 3.8. Précipitations d'octobre à juin observées (ligne continue) et estimées (ligne en pointillée) sur la période totale de calibration 1931-2009 pour la région des Aurès. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1.

La reconstruction des précipitations d'octobre à juin pour la période totale de 249 années allant de 1761 à 2009 est présentée dans la figure 3.9. La courbe de tendance, calculée sur une moyenne mobile de 10 années décalées d'une année, met en évidence des variations interannuelles à décennales des précipitations reconstruites. La décennie la moins arrosée est 1993-2002 (cumul moyen de 261,9 mm) et la plus arrosée est 1968-1977 (cumul moyen de 341,7 mm). Par ailleurs

plusieurs périodes sont marquées par une faible variabilité des précipitations à des échelles interannuelle à multidécennale (cas de la période 1910 et 1941).

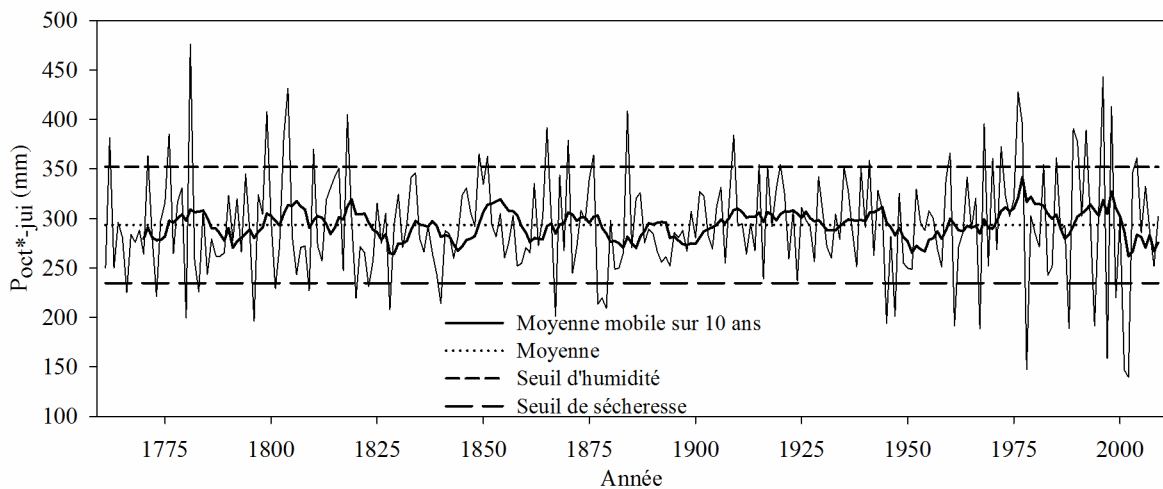


Figure 3.9. Précipitations reconstruites d’octobre à juin sur la période 1761-2009 pour la région des Aurès. L’astérisque (*) indique le mois de l’année t-1.

La reconstruction a enregistré 28 années sèches, dont 13 sur la période commune avec la région de Kabylie (1898-2009) (annexe 3.11). L’intervalle moyen entre deux années sèches est d’environ neuf ans. Vingt-et-un événements ont une durée d’une seule année. Seuls deux événements sont multi-annuels : une période de sécheresse de trois années consécutives est survenue entre 1877 et 1879 et une autre de deux années a été identifiée entre 2001 et 2002. L’année la plus sèche de la reconstruction est 2002 avec une précipitation de 139,5 mm, soit une précipitation inférieure à la moyenne d’environ 53 %. Pour la donnée instrumentale, l’année la plus sèche est 1945 avec une précipitation de 117,9 mm, soit une précipitation inférieure à la moyenne d’environ 61 %. Les neuf années les plus sèches de toute la reconstruction ont marqué les dernières décennies entre 1945 et 2002.

Les années humides sont au nombre de 26, dont 11 sur la période commune avec la région de Kabylie (1898-2009) (annexe 3.12). L’intervalle moyen entre deux années humides est d’environ 10 ans. La plus longue période humide s’étale sur deux années, avec trois événements enregistrés sur les périodes 1803-1804, 1976-1977 et 1989-1990. L’année la plus humide est 1781 avec une précipitation de l’ordre de 476 mm, soit une précipitation supérieure à la moyenne d’environ 21 %.

Par ailleurs, 10 épisodes avec succession d'années extrêmes, sèches et/ou humides, ont été identifiés. Six de ces événements sont survenus à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle. Sur la dernière période de 14 ans, de 1988 à 2002, seules 4 années (1991, 1993, 1995, 2000) n'ont pas été marquées par un événement extrême.

La figure 3.10 montre que plusieurs épisodes récurrents de sécheresse sévère se sont produits au cours de la période 1761-2009. Néanmoins, les dernières décennies sont les plus défavorables. Le déficit pluviométrique maximum a été enregistré au cours des décennies 1993-2002 et 1994-2003 (35 mm). Les sécheresses les plus sévères sont survenues en 1978 (déficit de 94,2 mm), 1997 (déficit de 82,7 mm), 2001 (déficit de 94,8 mm) et 2002 (déficit de 102 mm).

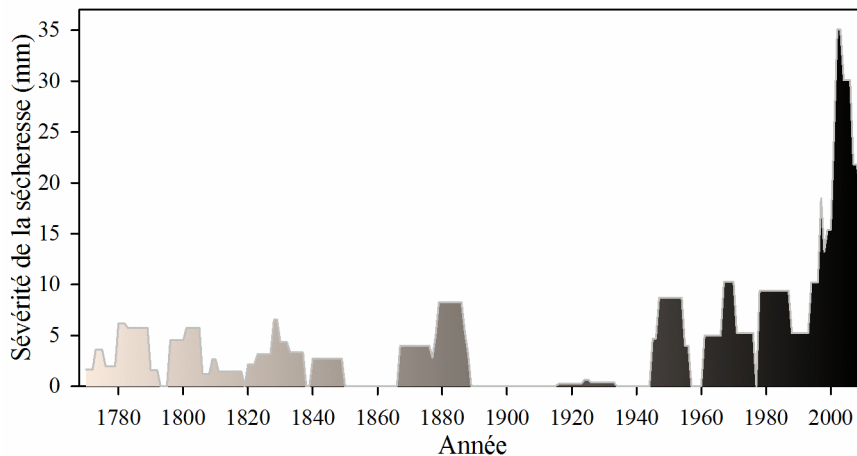


Figure 3.10. Sévérité de la sécheresse sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année pour la région des Aurès. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

3.3.3.2. Reconstruction des précipitations pour la région de Kabylie

Le modèle linéaire de la reconstruction des précipitations pour la région de Kabylie est basé sur l'équation suivante :

$$P_{\text{oct*}-\text{jui}} = 692 + 365 * CP1$$

Où $P_{\text{oct*}-\text{jui}}$ est le cumul moyen des précipitations d'octobre à juin pour la période 1983-2011, et CP1 la première composante principale (scores factoriels).

Le coefficient de détermination ajusté de calibration est très hautement significatif ($r^2 = 0,40$, $n = 29$, $p < 0,001$). Le critère de validation croisée, PRESS, utilisé dans la procédure de validation du modèle statistique de la reconstruction des précipitations a généré un coefficient de détermination de prédiction très hautement significatif ($r^2 = 0,35$, $n = 29$, $p < 0,001$), légèrement inférieur au coefficient de détermination ajusté de calibration.

Sur la figure 3.11 sont présentées les précipitations observées et estimées pour la période de calibration. Le coefficient de corrélation de Pearson entre les deux séries est de 0,67 ($n = 29$, $p < 0,001$). Ces dernières présentent une différence de hauteur moyenne des précipitations d'octobre à juin pour la période 1983-2011 de seulement 0,4 mm.

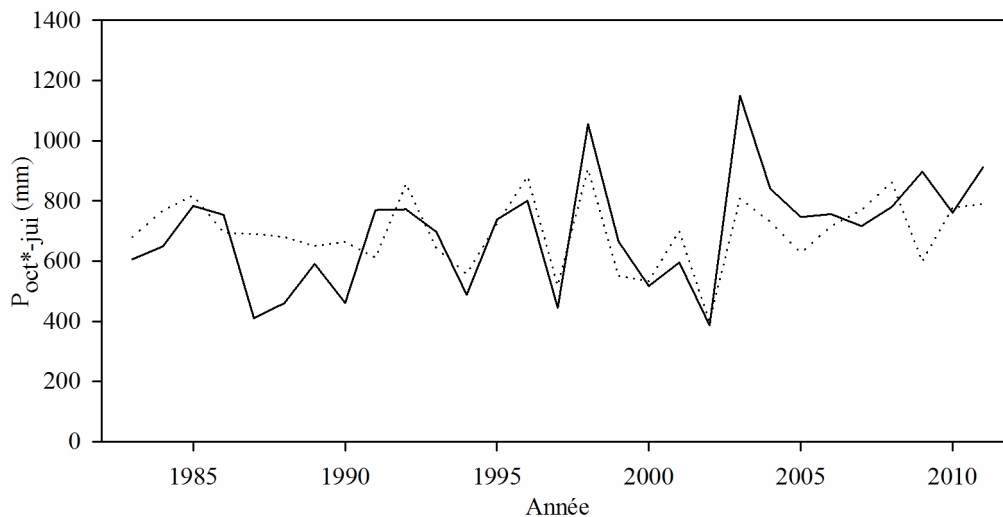


Figure 3.11. Précipitations d'octobre à juin observées (ligne continue) et estimées (ligne en pointillée) sur la période totale de calibration 1983-2011 pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1.

La reconstruction des précipitations d'octobre à juin pour la période 1898-2011 est présentée dans la figure 3.12. Comme dans le cas des Aurès, des variations interannuelles à décennales des précipitations sont détectées sur la courbe de tendance, calculée sur une moyenne mobile de 10 années décalées d'une année. Le minimum a été enregistré sur la décennie 1993-2002 (cumul moyen de 641,6 mm) et le maximum sur l'intervalle 1948-1957 (cumul moyen de 740,1 mm).

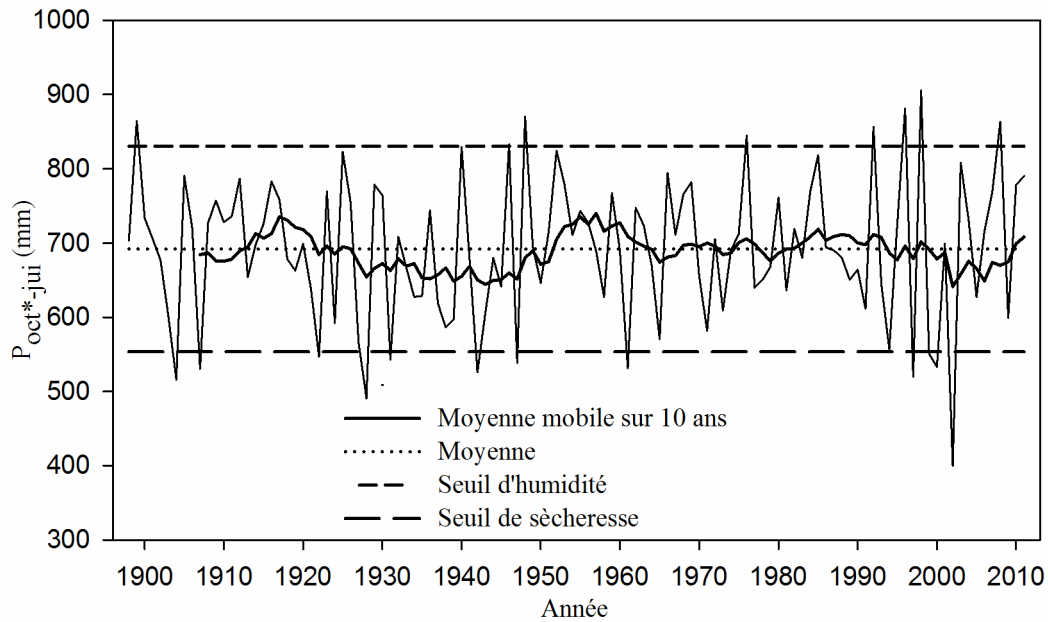


Figure 3.12. Précipitations reconstruites d’octobre à juin sur la période 1898-2011 pour la région de Kabylie. L’astérisque (*) indique le mois de l’année t-1.

Sur la période de 114 années de la reconstruction, 13 années ont été sèches (annexe 3.11), dont 6 sont communes avec la région des Aurès (1947, 1961, 1994, 1997, 1999 et 2002). L’intervalle moyen entre deux années sèches est d’environ huit ans. Un seul événement de sécheresse a été identifié sur deux années successives (1999-2000). L’année la plus sèche de la reconstruction est 2002 avec une précipitation de 399,5 mm, soit une précipitation inférieure à la moyenne d’environ 42 %. Il en est de même pour la donnée instrumentale où l’année 2002 a enregistré une hauteur des précipitations d’octobre à juin de l’ordre de 387 mm, soit une précipitation inférieure à la moyenne d’environ 44 %.

La reconstruction a enregistré sept années humides (annexe 3.12), dont quatre ont aussi été identifiées pour la région des Aurès (1976, 1992, 1996 et 1998). L’intervalle moyen entre deux années humides est d’environ 16 ans. L’année la plus humide est 1998 avec une précipitation de 905,7 mm, soit une précipitation d’environ 31 % supérieure à la moyenne.

Deux épisodes avec succession d’années extrêmes, sèches et/ou humides, ont été identifiés : le premier est d’une durée de deux ans, avec une année sèche (1947)

et une année humide (1948) ; le deuxième s'étale sur cinq ans (1996-2000) avec deux années humides (1996 et 1998) et trois années sèches (1997, 1999 et 2000).

Plusieurs épisodes récurrents de sécheresse sévère ont été enregistrés sur la période 1898-2011 (fig. 3.13). Néanmoins, comme dans le cas de la région des Aurès, les dernières décennies étaient les plus défavorables. Le déficit pluviométrique maximum a été enregistré au cours des décennies 1993-2002 à 1997-2006 (22,6 mm). Les sécheresses les plus sévères sont survenues en 1904, 1928, 1997 et 2002, avec des déficits de 41,3 mm, 66,3 mm, 37,6 mm et 157,9 mm respectivement.

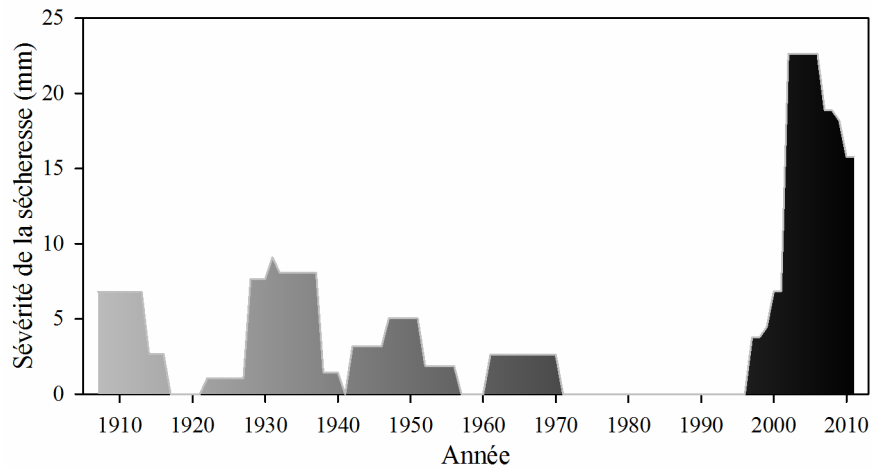


Figure 3.13. Sévérité de la sécheresse sur une moyenne mobile de 10 ans décalés d'une année pour la région de Kabylie. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

Bien que la hauteur des précipitations et l'amplitude des fluctuations soient plus élevées en Kabylie, la corrélation entre nos deux reconstructions sur la période commune 1898-2009 est très hautement significative ($r = 0,47$, $n = 111$, $p < 0,001$). Dans les deux régions, la variabilité des précipitations a été plus importante au cours des dernières décennies, avec une tendance plus prononcée pour la région des Aurès (fig. 3.14).

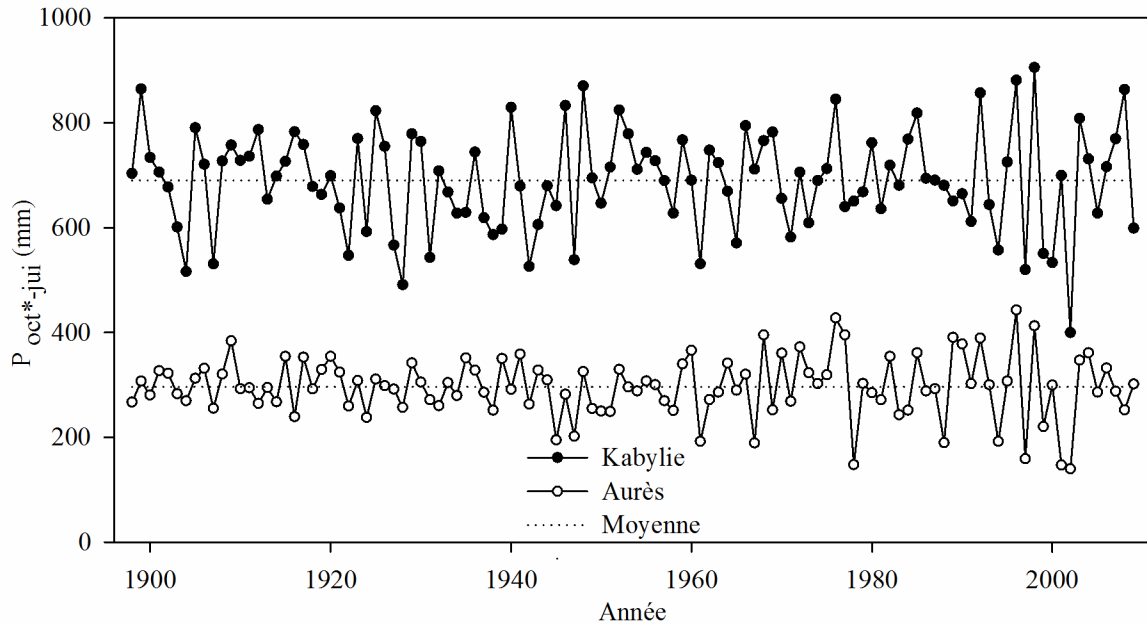


Figure 3.14. Précipitations reconstruites d’octobre à juin pour nos deux régions d’étude sur la période commune 1898-2009. L’astérisque (*) indique le mois de l’année t-1.

3.4. Discussion

3.4.1. Caractéristiques des chronologies développées

Dans l’ensemble, les chronologies maîtresses de la région des Aurès sont plus longues que celles établies pour la région de Kabylie. Le cèdre de l’Atlas est un matériel biologique plus ou moins facile à dater. Sur 199 arbres échantillonnés seuls huit n’ont pas pu être datés. Le problème majeur rencontré lors de l’interdatation est le fait que ces échantillons présentent de longue série de cernes très minces. Par ailleurs, la datation a été plus facile pour les cédraies de Kabylie, relativement plus jeunes. Le nombre de segments présentant de possibles erreurs de datation est faible par rapport à la longueur des séries chronologiques. Lors du contrôle statistique de la qualité de la datation, COFECHA a signalé plusieurs segments avec de possibles erreurs, indiquant une meilleure corrélation avec un autre segment de la chronologie maîtresse (tableaux 3.2 et 3.6). Cependant, la vérification sur le bois a permis de s’assurer que les dates assignées aux cernes des segments en question sont correctes, confirmant ainsi la fiabilité de l’interdatation au niveau des deux régions d’étude.

Peu de cernes absents ont été identifiés sur les chronologies de la région de Kabylie, mis à part un taux de 0,44 % obtenu à Tigounatine (tableau 3.6). Ce site présente les conditions les plus contraignantes à la croissance des arbres des quatre sites échantillonnés dans le Djurdjura, avec notamment une pente plus raide, un sol moins profond et une piérosité plus élevée. Cela dit, comme le démontrent Wilmking *et al.* (2012), le facteur âge peut être aussi déterminant. En effet, ce site présente la plus longue chronologie obtenue dans cette région. Le nombre de cernes manquants est nettement plus élevé dans les chronologies de la région des Aurès (tableau 3.2). Cela peut s'expliquer principalement par les conditions climatiques plus contraignantes de cette région. Néanmoins, au niveau des deux régions, des cernes manquants pourraient être dus à d'autres facteurs, tels que les conditions de surcimage dans lesquelles auraient vécu plusieurs individus en début de croissance (Parent *et al.*, 2002), ou suite à d'éventuels épisodes de défoliation par les insectes (Wagener, 1961 ; Brubaker, 1978). Pour la période commune entre les quatre chronologies de la région des Aurès (1732-2009), le pourcentage en cernes absents décroît en allant d'est en ouest. La même tendance est rapportée dans les travaux de Kherchouche *et al.* (2012, 2013), qui signalent un taux en cernes absents de 1,37 % pour un site au niveau du massif de l'Aurès (Chélia), contre 0,70 % pour un autre site au niveau du massif du Belezma. Cependant, nos résultats pour les chronologies des sites plus ou moins adjacents à ces derniers sont plus faibles : dans le massif de l'Aurès, les chronologies de Thniet Zemroune (Chélia) et Ichmoul ont enregistré les taux en cernes absents de 0,80 et 0,73 % respectivement, tandis qu'un taux de 0,59 % a été enregistré au niveau du massif du Belezma pour notre chronologie de Tuggurt.

Pour le site de Tigounatine, en Kabylie, et pour tous les sites de la région des Aurès, le nombre de cernes absents est plus élevé au cours du dernier siècle, avec une tendance plus marquée pour la deuxième moitié du xx^e siècle pour les chronologies de la région des Aurès. Néanmoins, la plus haute fréquence en cernes manquants a été enregistrée au milieu du xix^e siècle (1858) à Tigounatine. Tandis que les plus hautes fréquences pour la région des Aurès ont marqué le début du xxi^e siècle (2001 et 2002). Une tendance similaire a été rapportée par Kherchouche *et al.*

(2013) au niveau du massif du Belezma où 17 cernes manquants ont été signalés entre 1950 et 2002 sur un total de 19 cernes manquants identifiés sur une chronologie couvrant la période 1840-2002, avec notamment 99 % de cernes absents enregistrés en 2001 et 2002.

Les résultats de la standardisation montrent que les chronologies maîtresses résiduelles sont les meilleures pour les analyses dendroclimatiques (tableaux 3.3, et 3.7). Ces chronologies affichent, entre autres, des coefficients d'autocorrélations d'ordre 1 presque nuls, dénotant l'élimination de la rémanence des conditions antérieures de croissance persistante dans les chronologies standard et Arstan. Les résultats montrent que les sites les plus sensibles sont ceux qui expriment la variabilité de la croissance la plus élevée, comme le montrent les valeurs de l'écart type. Ceci est dû au fait que les séries individuelles composant les chronologies maîtresses de ces sites comprennent un nombre élevé de cernes diagnostiques. Ainsi, au niveau de la région des Aurès, ce sont ces mêmes chronologies qui enregistrent les corrélations moyennes inter-arbres les plus élevées, produisant un fort signal commun entre les séries, traduit par des valeurs élevées de la variance du premier vecteur propre (tableau 3.4). Des résultats similaires ont été rapportés par Henderson (2006) pour sept chronologies de *Pinus palustris* du sud-est des États-Unis, Touchan *et al.* (2014) pour neuf chronologies de formations à *Pinus brutia*, *Pinus nigra* et *Cedrus brevifolia* de l'ouest de l'île de Chypre et Kherchouche *et al.* (2012, 2013) pour deux cédraies de la région des Aurès. Pour la région de Kabylie, les corrélations moyennes inter-arbres au niveau des quatre sites sont comparables (tableau 3.8). Il en est de même pour le signal commun exprimé par la variance du premier vecteur propre. Ceci reflète l'homogénéité des conditions écologiques intra-site, plus élevée au niveau de la région de Kabylie où les peuplements échantillonnés sont moins étendus et situés dans un étage bioclimatique perhumide. Ceci explique le fait que les chronologies de cette région expriment un signal plus faible par rapport à celui détecté dans les chronologies de la région des Aurès où le climat est plus contraignant.

Les chronologies résiduelles basées sur le seuil d'EPS de 0,85 retenues pour l'analyse dendroclimatique sont suffisamment répliquées pour la détection du signal

climatique sur de longues périodes, avec notamment une taille moyenne du segment assez étendue pour l'étude de la variabilité climatique haute et moyenne fréquences. La taille moyenne du segment est supérieure à 200 ans dans trois sites de la région des Aurès et dans un site de la région de Kabylie (tableaux 3.5 et 3.9). Avec un ajustement conservatif approprié, ces chronologies peuvent même être utilisées pour l'étude de la variabilité climatique basse fréquence. Dans l'ensemble, nos chronologies présentent des caractéristiques comparables à celles établies par Touchan *et al.* (2008a, 2010) et Kherchouche *et al.* (2012, 2013) au niveau des cédraies de nos régions d'étude.

3.4.2. Analyse du signal climatique

Contrairement à la corrélation intra-site, la corrélation inter-site est plus élevée au niveau de la région de Kabylie (tableaux 3.10 et 3.13). Ceci est dû au fait que nos sites de la région des Aurès sont situés sur différents massifs distants les uns des autres au niveau de l'Atlas saharien, tandis que ceux de la région de Kabylie sont rassemblés dans un seul massif, le Djurdjura. Cela dit, dans les deux cas de figure la corrélation est très hautement significative, ce qui permet une reconstruction climatique basée sur la variabilité commune de la croissance des quatre sites pour chaque région, exprimée par la variance de la CP1, seule composante significative (fig. 3.3 et 3.6).

Comme prévu, le signal climatique détecté dans les chronologies résiduelles est plus fort pour la région des Aurès, caractérisée par des conditions climatiques plus contrastées et faisant partie de la limite méridionale de l'aire de distribution géographique du cèdre de l'Atlas en Algérie. En effet, les arbres croissant à la limite de leur aire naturelle (altitudinale ou latitudinale) sont particulièrement sensibles à la variabilité climatique (Fritts, 1976). Des résultats similaires ont été rapportés par Touchan *et al.* (2010) pour les mêmes régions d'étude.

La reconstruction climatique n'est fiable que pour les précipitations. Pour la région de Kabylie, la série de données des températures moyennes mensuelles est trop courte pour être impliquée dans l'analyse des fonctions de réponse. Pour la région des Aurès, seules les précipitations ont montré une corrélation stable dans le

temps avec la croissance (tableau 3.12). Plusieurs études ayant trait à la reconstitution du climat passé dans la région méditerranéenne ont porté sur la reconstruction des précipitations (Till et Guiot, 1990 ; Touchan *et al.*, 2008a, 2008b 2010, 2014 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Griggs *et al.*, 2013 ; Köse *et al.*, 2013). Par ailleurs, malgré la différence dans la force du signal climatique détecté dans les séries chronologiques, la meilleure période de reconstruction des précipitations est la même pour nos deux régions d'étude. Elle est de neuf mois allant d'octobre de l'année t-1 à juin de l'année t. La même période a été utilisée pour la reconstruction des précipitations par Touchan *et al.* (2008b) pour le nord-ouest tunisien et Kherchouche *et al.* (2012, 2013) pour la région des Aurès.

3.4.3. Reconstruction des précipitations

Les résultats des paramètres utilisés pour valider les modèles statistiques de reconstruction pour les deux régions d'étude démontrent la fiabilité des jeux de données utilisés sur les périodes totales de calibration pour la reconstruction des précipitations. Le critère de validation croisée prédit des coefficients de détermination très hautement significatifs, légèrement inférieurs aux coefficients de détermination ajustés de calibration. Ceci signifie que les modèles statistiques de reconstruction ne sont pas surajustés (Touchan *et al.*, 2014), justifiant ainsi leurs stabilités et bons pouvoirs prédictifs. Par ailleurs, la faible différence de la hauteur des précipitations entre les valeurs observées et reconstruites confirme la robustesse des modèles statistiques utilisés.

Les modèles établis par Kherchouche *et al.* (2012, 2013) pour la reconstruction des précipitations au niveau de la région des Aurès sont plus robustes que les nôtres. Les auteurs rapportent des coefficients de détermination légèrement supérieurs et des différences entre les hauteurs des précipitations observées et reconstruites plus faibles. Ceci est dû au fait que leurs reconstructions ont été établies séparément pour un seul site chacune, tandis que notre reconstruction couvre toute la région et a été établie sur la base de la variabilité commune de la croissance de quatre sites (PC1) localisés sur trois massifs distants les uns des autres. En effet, la reconstruction par la même approche, en remplaçant la PC1 par

la série d'indices de croissance du site de Tuggurt (affichant une forte contribution à la formation de la PC1) aboutit à des résultats similaires à ceux avancés par ces auteurs.

Les coefficients de détermination obtenus dans l'établissement du modèle statistique de reconstruction des précipitations pour la région de Kabylie sont inférieurs à ceux enregistrés pour la région des Aurès, dont le signal climatique détecté dans les chronologies est plus fort. Néanmoins, malgré l'éloignement de la station météorologique de Tizi Ouzou de nos sites d'étude, la reconstruction pour la région de Kabylie a donné des résultats très satisfaisants, avec notamment des hauteurs des précipitations observées et reconstruites quasi-identiques. Ainsi, l'éloignement de la station météorologique de la zone d'étude semble bien compensé par l'homogénéité des patrons de croissance des quatre sites impliqués dans la reconstruction.

Les courbes de tendance, calculées pour une moyenne mobile sur 10 années décalées d'une année, mettent en évidence des variations interannuelles à décennales des précipitations reconstruites (fig. 3.9 et 3.12). Il s'agit de signaux climatiques de haute et moyenne fréquences, traduits par des périodes de sécheresse et d'humidité prolongées survenues pendant les périodes d'analyse au niveau des deux régions.

L'analyse des résultats montre plusieurs points communs entre nos deux reconstructions corrélées très significativement ($r = 0,47$, $n = 111$, $p < 0,001$). La similitude des tendances d'évolution des précipitations au niveau de nos deux régions d'étude est plus prononcée aux cours des dernières décennies. En effet, les six années sèches en commun entre les deux reconstructions, ainsi que les neuf années les plus sèches sur toute la reconstruction de la région des Aurès, ont été identifiées sur la même période, à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle (annexes 3.6 et 3.8). Les années humides communes aux deux reconstructions ont aussi été identifiées au cours de la même période entre 1976 et 1998 (annexes 3.7 et 3.9). L'analyse des épisodes avec succession d'années extrêmes, sèches et/ou humides, ayant marqué les deux reconstructions montre que la variabilité des précipitations a été plus forte au cours des dernières décennies. Cette tendance est

plus marquée pour les années sèches. En outre, les épisodes récurrents de sécheresse sévère enregistrés au niveau des deux régions d'étude montrent que les dernières décennies étaient les plus défavorables. Nos résultats corroborent ceux avancés par Planells *et al.* (2005) au niveau des Pyrénées orientales espagnoles, Esper *et al.* (2007) pour le Maroc, Touchan *et al.* (2008a) pour l'Algérie et la Tunisie, Touchan *et al.* (2008b) pour le nord-ouest tunisien, Touchan *et al.* (2010) pour le nord-ouest africain et Kherchouche *et al.* (2012, 2013) pour deux sites de la région des Aurès. Par ailleurs, Nicault *et al.* (2008) signalent que le xx^e siècle est significativement la période la plus sèche des dernières 500 années sur l'ensemble de la région méditerranéenne.

Sur la période commune 1898-2009, le nombre d'années sèches (13) est le même pour nos deux reconstructions. Il en est de même pour l'année la plus sèche (2002). Kherchouche *et al.* (2012, 2013) notent que l'année la plus sèche pour deux sites de la région des Aurès est 1978. Cette différence est principalement due à l'approche adoptée pour la reconstruction des précipitations. Les résultats de la standardisation (tableau 3.3) montrent, entre autres, que les sites impliqués dans notre reconstruction n'ont pas le même degré de sensibilité. Or, la reconstruction avec un ensemble de sites est basée sur un signal climatique moyen détecté sur l'ensemble d'une aire d'étude que couvrent ces derniers. En effet, les résultats d'une reconstruction pour le seul site de Tuggurt nous ont aussi donné l'année 1978 comme la plus sèche sur la période 1761-2009. Cela dit, nos résultats sont très comparables à ceux rapportés par ces auteurs, qui signalent tout de même l'année 2002 comme l'une des plus sèches de leurs reconstructions. Sur les 28 années sèches de notre reconstruction pour la région des Aurès, 19 ont été signalées par Kherchouche *et al.* (2012) pour un site du mont Chélia sur la période commune 1761-2009. La similitude est encore plus nette avec les résultats rapportés pour un site du massif du Belezma par Kherchouche *et al.* (2013), qui signalent 15 années sèches sur un total de 17 années sèches identifiées sur notre chronologie sur la période commune 1845-2009. Pour la région de Kabylie, la comparaison avec les travaux de Kherchouche *et al.* (2012, 2013) est quasi-identique à celle détaillée entre nos deux régions d'étude (avec une différence sur une seule année sèche). En

effet, 6 et 7 années sèches sur un total de 13 années sèches que compte notre chronologie ont été identifiées dans les reconstructions de Kherchouche *et al.* (2012, 2013) pour les sites du massif du Belezma et du mont Chélia respectivement, sur la période commune 1898-2008.

Plusieurs années sèches sur notre reconstruction coïncident avec celles rapportées par d'autres auteurs pour le Bassin méditerranéen. Dans une reconstruction de l'indice de sévérité de la sécheresse de Palmer de mai à août pour l'Algérie et la Tunisie, Touchan *et al.* (2008a) signalent que sur la période 1456-2002, l'année 2002 a été la plus sèche, suivie de l'année 1867 qui est aussi identifiée sur notre reconstruction pour la région des Aurès. Ces auteurs signalent que la plus longue période de sécheresse de leur chronologie s'étale sur quatre ans entre 1999 et 2002. Ceci coïncide avec la période la plus longue de sécheresse, de deux années successives, obtenue pour la région de Kabylie (1999-2000). Il est aussi à signaler, que pour nos deux reconstructions, trois années sur quatre ont été sèches entre 1999 et 2002 : 1999, 2001 et 2002 pour la région des Aurès et 1999, 2000 et 2002 pour la région de Kabylie. Notre plus longue période de sécheresse pour la région des Aurès est de trois années (1877-1879). Elle coïncide avec celles rapportées par Kherchouche *et al.* (2012, 2013). Un résultat similaire a aussi été rapporté par Touchan *et al.* (2008a) qui signalent un indice de sévérité de la sécheresse de Palmer inférieur à la moyenne sur la période 1876-1881. Les années sèches 1820, 1828, 1867, 1877 et 1988 (pour la région des Aurès) et 1961 et 2002 (pour nos deux régions d'étude) ont été aussi identifiées par Touchan *et al.* (2008b) dans une reconstitution des précipitations d'octobre à juin dans le nord-ouest tunisien. Ces auteurs ont aussi rapporté une année humide (1976) identifiée dans nos deux chronologies. L'année sèche 1928 de notre reconstruction pour la région de Kabylie a aussi été mentionnée par Touchan *et al.* (2005a) dans leur reconstruction des précipitations de mai à août pour l'est méditerranéen. Cette date fait partie de la période de famine qui a sévi en Anatolie entre 1926 et 1929 rapportée par Purgstall (1983) in Touchan *et al.* (2005b). Plusieurs de nos années extrêmes ont aussi été identifiées par Touchan *et al.* (2014) dans une reconstruction des précipitations de mai à juillet dans l'île de Chypre. Les années sèches

communes sont 1840, 1879, 1916, 1945 et 1978 avec la région des Aurès et 1928 et 2000 avec la région de Kabylie. La coïncidence est plus marquée pour les années humides, dont les années 1762, 1810, 1818, 1876, 1884, 1968, 1972 et 1977 ont été communes avec notre reconstruction pour la région des Aurès, et 1976, 1992, 1998 avec nos deux reconstructions. L'année sèche 1796 de notre reconstruction pour la région des Aurès a été identifiée par Fernández-Fernández *et al.* (2011) pour le sud-ouest de l'Espagne. Ces auteurs signalent aussi une période humide de huit ans de 1799 à 1807. Trois années humides ont été identifiées sur la même période dans notre reconstruction pour la région des Aurès : 1799 puis, successivement, 1803 et 1804. Nicault *et al.* (2008) signalent une période sèche pour la décennie 1945-1955 au niveau des parties centrale et occidentale du bassin méditerranéen. Nos résultats montrent que la sécheresse a commencé à être plus fréquente et intense à partir des années 1940. Durant cette décennie, deux années sèches ont été enregistrées sur chacune de nos reconstructions (1942 et 1947 pour la région de Kabylie et 1945 et 1947 pour la région des Aurès).

Les périodes principales d'extrême sécheresse identifiées dans nos chronologies se recoupent avec les épisodes d'épidémies, d'invasions massives de criquets migrateurs et de famine signalés en Algérie dans plusieurs documents littéraires, historiques et scientifiques. L'année 1867 a été une année de choléra qui tua environ 3 000 personnes dans la région de Batna (Dukerley, 1868). Kitouni (2013) rapporte que 1867 et 1868 furent deux années de grande sécheresse suivie d'une invasion de sauterelles, ainsi que d'une épidémie de choléra et de typhus qui firent des ravages parmi une population fragilisée. L'auteur ajoute que si la famine fut moins ressentie en Kabylie, elle tua 500 000 personnes, soit 1/5 de la population de l'Algérie de cette époque. Taithe (2006) *in* Touchan *et al.* (2008a) note que l'Algérie a subi une période de sécheresse, d'épidémie de choléra et des invasions acridiennes entre 1876 et 1881. Ceci coïncide avec une période de forte mortalité du cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès, du Belezma et du Djurdjura (Lapie, 1909 ; Boudy, 1950 *in* Abdessemed, 1981). Les années 1940 ont aussi été rapportées dans les œuvres de Camus (1947, 1948) comme une période

d'inquiétude continue par rapport à la sécheresse, la peste et la famine. Tinthoin (1946) signale que les années 1938 à 1945 ont été marquées par de faibles rendements agricoles et que le cheptel a subi de grosses pertes suite à une sécheresse de plus en plus accentuée, notamment entre 1942 et 1945. Sur nos deux reconstructions, la décennie 1940 a été marquée par six années avec une précipitation inférieure à la moyenne. Ces dernières ont notamment marqué les périodes d'années successives 1941-1945 et 1944-1946 pour la région de Kabylie et des Aurès respectivement. Abdessemed (1981) note une période de sécheresse entre 1977 et 1978 qui avait conduit à un autre épisode de dépérissement forestier dans le massif de l'Aurès. Yachir et Abdoun (1986) rapportent qu'en cette période de sécheresse la production algérienne des céréales destinées à l'alimentation humaine, comme le blé dur et le blé tendre, qui couvrait 70 % des besoins en 1969, n'en couvrait plus que 40 % en 1978. Enfin, la période de sécheresse la plus sévère de nos reconstructions, enregistrée au début du XXI^e siècle, coïncide avec un autre épisode de dépérissement du cèdre de l'Atlas en Algérie (Bentouati, 2008 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013) et même au Maroc (El Abidine, 2003 ; Linares *et al.*, 2011).

Les tendances globales d'évolution de la sévérité de la sécheresse ont été plus ou moins similaires entre nos deux régions d'étude. Néanmoins, cette similitude était de loin plus prononcée au cours des dernières décennies quand les conditions climatiques étaient les plus contraignantes (fig. 3.10 et 3.13). Dans l'ensemble, les résultats montrent qu'il est tout à fait possible d'établir une reconstruction commune pour les deux régions d'étude, ou d'impliquer ces dernières dans des reconstructions à plus grandes échelles.

3.5. Conclusion

La présente étude est l'une des premières ayant trait à la reconstruction climatique en Algérie. Deux reconstructions dendroclimatiques des précipitations d'octobre à juin ont été réalisées au niveau des limites septentrionale et méridionale de l'aire de distribution naturelle du cèdre de l'Atlas en Algérie.

Les caractéristiques de nos chronologies dénotent la bonne qualité de l'échantillonnage opéré sur des sites sensibles à la variabilité climatique traduisant par là même le potentiel des cédraies étudiées pour la reconstruction des précipitations. Comme prévu, le signal climatique détecté dans les chronologies est plus fort au niveau de la région des Aurès, située aux portes du désert et caractérisée par des conditions climatiques plus contraignantes pour la croissance des arbres. Cela dit, le degré de similitude des tendances d'évolution des précipitations reconstruites au niveau des deux régions met en évidence la possibilité d'une reconstruction commune, basée sur la variabilité de la croissance sur l'aire couverte par les huit sites échantillonnés.

Au niveau des deux régions d'étude, des variations interannuelles à décennales des précipitations d'octobre à juin ont été observées sur l'ensemble des périodes de reconstruction. Néanmoins, la plus forte variabilité a été identifiée à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle et les épisodes de sécheresse les plus sévères ont caractérisé les dernières décennies, avec un pic sans précédent enregistré au début du xxi^e siècle.

Comprendre le climat passé permet de prévoir sa variabilité future. À la lumière des résultats présentés dans cette étude, il est évident que les épisodes de sécheresse intense et de plus en plus fréquents font planer une menace réelle sur le plan socio-économique et les ressources forestières et hydrologiques dans nos régions d'étude. Par conséquent, la tendance à l'utilisation de moyens à coûts et charges de plus en plus élevés n'est pas à écarter, si des mesures adéquates ne sont pas prises pour faire face à la variabilité climatique actuelle que subit toute la région méditerranéenne.

Chapitre IV

Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

Chapitre IV

Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

4.1. Introduction

Le climat a changé au cours du dernier siècle et il est prévisible qu'il continuera à changer dans le futur (GIEC, 2007), conduisant à des températures de plus en plus élevées et à un changement des régimes de précipitation (Chmura *et al.*, 2011). Par conséquent, les modifications concernant les aires de distribution potentielle et réelle des espèces forestières seront considérables (Demarteau *et al.*, 2007).

Appréhender la réaction de la végétation aux fluctuations des conditions environnementales est crucial pour la prédiction de la réponse des écosystèmes au changement climatique (Chapin *et al.*, 1993). Le changement climatique actuel affecte significativement les forêts méditerranéennes (Resco de Dios *et al.*, 2007). Comme nous l'avons signalé dans le chapitre précédent et rapporté dans de récentes études dans le nord-ouest africain (Touchan *et al.*, 2008a, 2010 ; Linares *et al.*, 2011 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013), les dernières décennies ont été marquées par des épisodes de sécheresse récurrente. Ceci suggère que les conditions climatiques sont devenues plus limitantes à la croissance des arbres, notamment pour les espèces sensibles à la sécheresse et celles qui se développent en marge de leur aire de répartition géographique (Fritts, 1976). Le cèdre de l'Atlas est l'une des espèces qui ont été affectées par la variabilité climatique actuelle et passée (Lapie, 1909 ; Boudy, 1950 *in* Abdessemed, 1981 ; Abdessemed, 1981 ; Bentouati, 2008). Au cours des récentes décennies, des taux élevés de dépérissement ont été signalés en Algérie (Sarmoum, 2008 ; Alileche, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2012 et 2013 ; Megdoud, 2012) et au Maroc (El Abidine, 2003 ; Linares *et al.*, 2011). En Algérie, Allen *et al.* (2010) signalent que le dernier épisode du dépérissement du cèdre de l'Atlas a commencé par de petites surfaces sur des versants secs et ensoleillés dans les zones arides au niveau de l'Atlas saharien, qui auraient par la suite évolué pour former des surfaces plus larges où sont affectées toutes les expositions et catégories d'âge. Par contre, au niveau de l'Atlas tellien, proche de la côte méditerranéenne, le

dépérissement n'a touché que des sujets âgés sur des versants secs. Les cas extrêmes de dépérissement ont été observés dans la région des Aurès (Bentouati, 2008 ; Kherchouche *et al.*, 2013). Le Parc National de Belezma a enregistré le taux de mortalité des arbres le plus élevé : au niveau du mont Tuggurt, le dépérissement est notable sur de grands espaces envahis par le frêne épineux (*Fraxinus xanthoxyloïdes*), tandis qu'au niveau du mont Boumerzoug le cèdre de l'Atlas a quasiment disparu et l'espace a été envahi par une autre espèce tolérante à la sécheresse, le chêne vert. Des résultats similaires ont été rapportés par Linares *et al.* (2011), qui signalent que les cédraies marocaines ayant subi des dommages majeurs dus à la sécheresse sévère, au pâturage et à l'exploitation du bois pourraient être sur un processus d'évolution vers des formations forestières dominées par des essences plus tolérantes à la sécheresse, dont le chêne vert (*Q. rotundifolia*). Benabid (1994) rapporte que la steppisation gagne de plus en plus les cédraies du Moyen-Atlas oriental et encore plus celles du Haut-Atlas. L'auteur ajoute que c'est le cas aussi des cédraies du Hodna, du Belezma et de l'Aurès en Algérie. Selon Cheddadi *et al.* (2009), la distribution géographique du cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord a énormément évolué au cours de la fin du Quaternaire, et il est possible qu'à la fin de ce siècle cette espèce ne soit pas capable de survivre dans son aire de distribution actuelle.

Le présent travail a trait à l'analyse de la réponse à long terme du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique dans ses limites de distribution septentrionale et méridionale en Algérie. L'étude repose sur une approche dendrochronologique. Huit chronologies maîtresses ont été établies au niveau de huit sites équitablement répartis entre les cédraies des régions de Kabylie et des Aurès. Les séries dendrochronologiques d'indice de croissance ont été utilisées pour analyser l'impact de la variabilité climatique sur la croissance des arbres sondés. Les principaux paramètres utilisés à cet effet sont les fréquences relatives en cernes diagnostiques (minces et épais), 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. L'objectif principal de cette étude est (*i*) d'analyser le signal climatique commun entre les arbres sondés dans un site donné, puis entre les sites d'une même

région et enfin sur l'ensemble des sites des deux régions d'étude et (ii) de vérifier si la variabilité climatique, avec les conditions de plus en plus limitantes signalées dans le chapitre précédent, est positivement corrélée avec la réponse commune des arbres. Le cas échéant, nous pourrions avancer l'hypothèse d'une évolution vers une influence macroclimatique sur la croissance des arbres de plus en plus importante au niveau de notre aire d'étude.

4.2. Matériel et méthodes

La présente étude repose en partie sur les huit chronologies résiduelles basées sur un seuil d'EPS de 0,85 établies dans le cadre de la reconstruction climatique. L'échantillonnage, la préparation des échantillons ainsi que l'interdatation et l'établissement des chronologies maîtresses sont détaillés dans le chapitre précédent. Par ailleurs, des chronologies résiduelles individuelles ont été établies pour chaque arbre daté afin d'analyser la tendance d'évolution des cernes diagnostiques, la variabilité commune de la croissance entre les arbres et la sensibilité moyenne au niveau de chaque site. Les paramètres de la procédure de standardisation sont les mêmes que ceux rapportés pour l'élaboration des chronologies maîtresses.

4.2.1. Variabilité de la croissance radiale

La variabilité de la croissance radiale a été approchée via l'analyse de l'évolution spatiotemporelle de l'indice de croissance, de la corrélation entre les sites et de la fréquence en cernes diagnostiques.

Une matrice de corrélation de Pearson a été calculée entre les séries d'indices de croissance des quatre sites échantillonnés au niveau de chacune de nos deux régions d'étude sur leurs périodes communes respectives. L'analyse de l'évolution dans le temps des corrélations observées a été basée sur le calcul du coefficient de corrélation de Pearson, sur une moyenne mobile d'indices de croissance pour une période de 20 ans décalés d'une année. Sur les figures, les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

Dans ce chapitre, le cerne diagnostique fait référence à un indice de croissance affichant une valeur extrême. Un cerne est considéré large quand l'indice de croissance est supérieur à la valeur « moyenne + écart-type », et mince quand il est inférieur à la valeur « moyenne – écart-type ». Les années avec une croissance extrême ont été identifiées pour chaque série individuelle. Ensuite, les fréquences relatives des chronologies en cernes larges et minces pour un site donné ont été calculées, puis présentées sous forme d'histogramme en prenant en considération pour chaque année calendaire le nombre d'arbres affichant une croissance extrême par rapport au nombre total d'arbres analysés. Enfin, deux histogrammes régionaux ont été réalisés, en se basant sur les séries moyennes d'indices de croissance des quatre chronologies résiduelles composant chacune de nos régions d'étude. Dans ce dernier cas, les fréquences ne sont présentées que pour les années dont les calculs sur les chronologies moyennes régionales montrent que le cerne est large ou mince.

4.2.2. Évolution spatio-temporelle de la variance commune de la croissance entre les sites et régions d'étude

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour évaluer la variabilité commune de la croissance entre les arbres. Les calculs ont été effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année sur trois niveaux spatiaux. Les séries résiduelles individuelles ont été utilisées pour évaluer la variabilité commune de la croissance entre les arbres à l'échelle du site. Tandis que les chronologies maîtresses ont été utilisées aux échelles de la région et de l'ensemble de l'aire échantillonnée, comprenant les huit sites répartis sur les des deux régions d'étude.

La variance expliquée par la CP1 a été utilisée comme un indicateur de la similarité entre les chronologies due au climat (Andreu *et al.*, 2007). La relation entre la variabilité commune de la croissance entre les chronologies et la variabilité climatique a été évaluée pour chacune de nos régions d'étude, au moyen d'une régression linéaire simple entre la variance expliquée par la CP1 et les précipitations reconstruites d'octobre à juin.

4.2.3. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne entre les sites et régions d'étude

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

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

Où I_t et I_{t+1} sont les valeurs d'indices de croissance adjacents.

Pour évaluer la variabilité spatiotemporelle de la sensibilité moyenne (SM_x), des calculs ont été effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année sur l'ensemble des séries individuelles pour chaque site et sur les quatre chronologies maîtresses pour chacune des régions, ainsi que sur l'ensemble des huit sites pour les deux régions d'étude.

Par ailleurs, une régression linéaire simple a été effectuée entre la sensibilité moyenne et les précipitations reconstruites d'octobre à juin pour chacune de nos régions d'étude, pour évaluer l'effet de la variabilité climatique sur la sensibilité des arbres sondés.

Il est à signaler que les analyses ayant trait à la détermination des cernes diagnostiques, à la variabilité commune de la croissance entre les arbres et à la sensibilité moyenne à l'échelle du site, donc impliquant les chronologies individuelles, ont été effectuées en se basant sur un nombre minimum de 10 arbres.

4.3. Résultats

4.3.1. Variabilité de la croissance radiale

4.3.1.1. Croissance radiale au niveau de la région des Aurès

Les chronologies résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 montrent une variabilité interannuelle de l'indice de croissance élevée (fig. 4.1). Guetiane affiche la variabilité la moins prononcée et le maximum est obtenu à Thniet Zemroune. La plus haute variabilité enregistrée sur une longue période a marqué les dernières décennies, à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle. Les années ayant enregistré un indice de croissance inférieur à la moyenne sont de l'ordre 48,3 % à Ichmoul,

49,6 % à Guetiane, 51,4 % à Tuggurt et 52,3 % à Thniet Zemroune. Les indices de croissance les plus faibles ont été enregistrés en 1978 pour Tuggurt et Ichmoul et en 2002 pour Thniet Zemroune et Guetiane. Les indices de croissance les plus élevés ont été enregistrés en 1450 pour Thniet Zemroune, 1781 pour Tuggurt, 1865 pour Ichmoul et 1996 pour Guetiane.

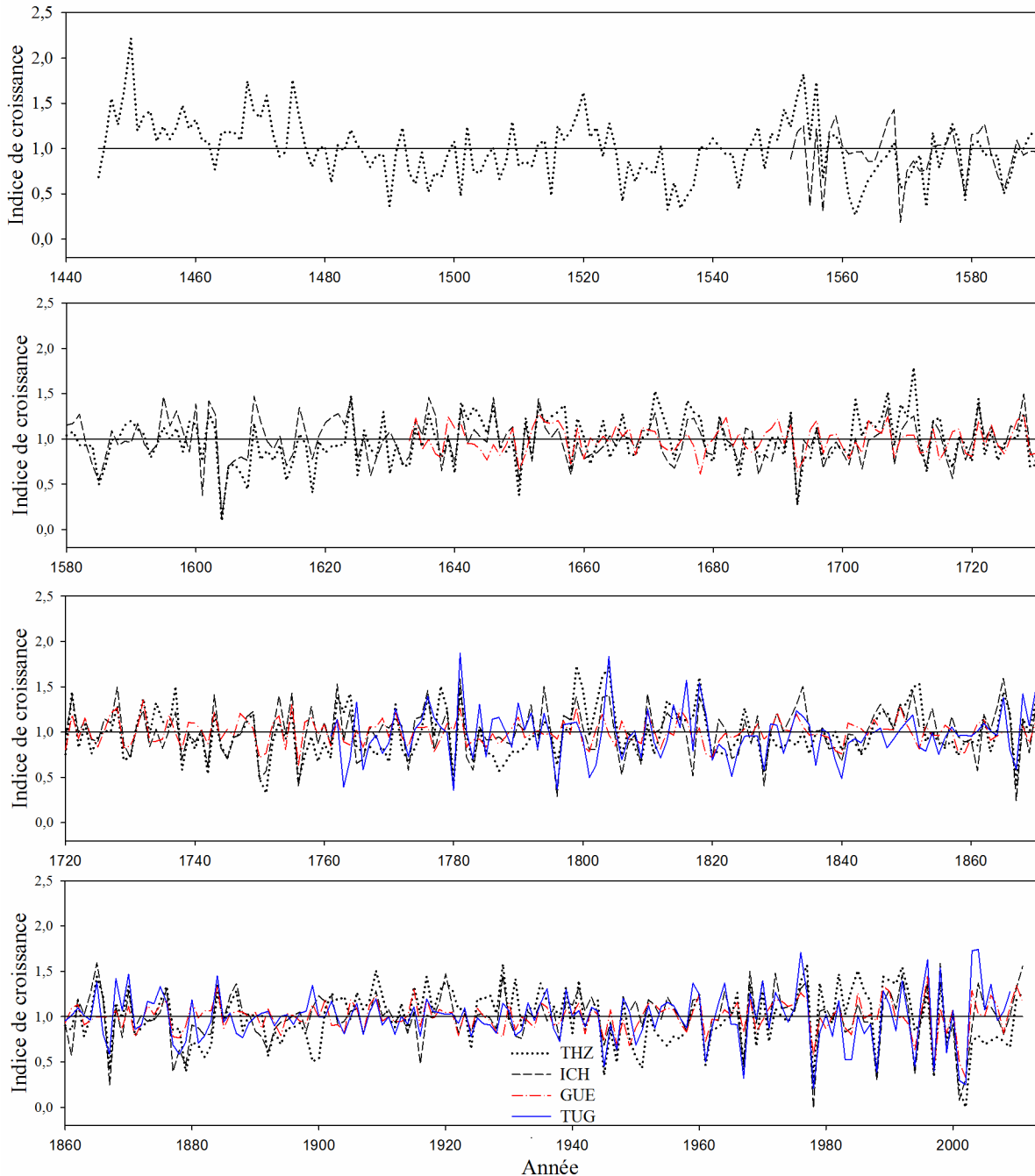


Figure 4.1. Chronologies maîtresses résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 pour la région des Aurès.

La figure 4.1 montre que dans l'ensemble les quatre chronologies affichent un bon synchronisme des patrons de croissance radiale. En effet, les coefficients de corrélation entre les quatre sites pris deux à deux sur leurs périodes communes respectives sont très hautement significatifs (tableau 4.1). Les corrélations les plus élevées ont été obtenues entre les sites les plus sensibles : le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,68 entre Ichmoul et Thniet Zemroune et 0,71 entre Tuggurt et Ichmoul. Cependant, cette corrélation a été marquée par une grande variabilité dans le temps (fig. 4.2). Sur plusieurs périodes, les chronologies ont montré un faible synchronisme, exprimé par une corrélation faible ou négative. Ceci a marqué les intervalles 1672-1691 entre Guetiane et Thniet Zemroune et Guetiane et Ichmoul, 1886-1905 entre Guetiane et Tuggurt, Guetiane et Ichmoul et Tuggurt et Ichmoul, 1888-1907 entre Guetiane et Thniet Zemroune, 1889-1908 entre Tuggurt et Thniet Zemroune et 1898-1918 entre Ichmoul et Thniet Zemroune.

Tableau 4.1. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région des Aurès. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson (r), le nombre d'observations (n) et la valeur p.

		THZ	ICH	GUE
ICH	r	0,68		
	n	460		
	p	0,000		
GUE	r	0,45	0,57	
	n	349	349	
	p	0,000	0,000	
TUG	r	0,49	0,71	0,60
	n	249	249	249
	p	0,000	0,000	0,000

Les niveaux les plus élevés de la corrélation ont été observés au cours des intervalles 1602-1621 et 1738-1757 entre Ichmoul et Thniet Zemroune, 1738-1757 et 1742-1761 entre Guetiane et Thniet Zemroune et 1741-1760 et 1742-1761 entre Guetiane et Ichmoul. En outre, l'analyse de la période couverte par tous les sites d'étude montre une corrélation élevée vers la fin des années 1870. Par ailleurs, après une chute brutale de la corrélation mentionnée pour le début du xx^e siècle, une

augmentation sensible a été observée à partir des années 1940, avec de nouveaux pics enregistrés à la fin des années 1970 et au début du xxi^e siècle.

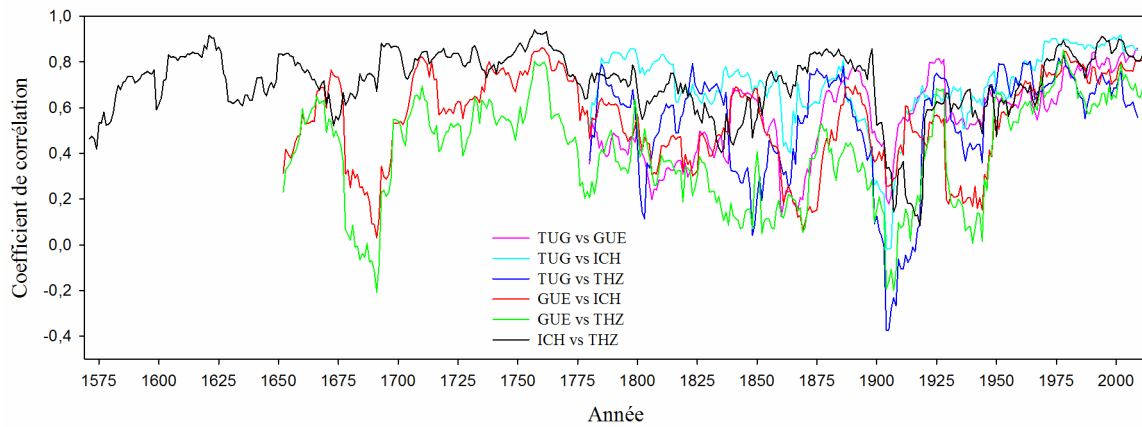


Figure 4.2. Évolution de la corrélation entre les chronologies résiduelles pour la région des Aurès. Le coefficient de corrélation de Pearson est calculé sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

Les cernes diagnostiques, représentés par les fréquences relatives des chronologies résiduelles en cernes larges et minces pour chaque site d'étude et pour l'ensemble de la région des Aurès, sont présentés dans la figure 4.3. La chronologie maîtresse de Thniet Zemroune a enregistré 65 cernes larges et 72 cernes minces sur une période de 500 années, de 1512 à 2011. Celle d'Ichmoul a enregistré 52 cernes larges et 57 cernes minces sur 398 années de 1613 à 2010. À Tuggurt 71 cernes larges et 56 cernes minces ont été identifiés sur une période de 177 années entre 1883 et 2009. Enfin, la chronologie de Guetiane a enregistré 184 cernes larges et 159 cernes minces sur 371 années entre 1641 et 2011. Par ailleurs, 35 cernes larges et 28 cernes minces ont été identifiés sur une période de 249 années de 1761 à 2009 sur la chronologie moyenne régionale de la région des Aurès.

Les fréquences relatives en cernes épais et minces varient d'un site à un autre. Néanmoins, leurs tendances d'évolution sont relativement les mêmes pour les quatre sites d'étude. La figure des fréquences relatives en cernes minces et épais pour l'ensemble de la région des Aurès montre une augmentation nette dans le temps, avec une croissance extrême à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle.

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

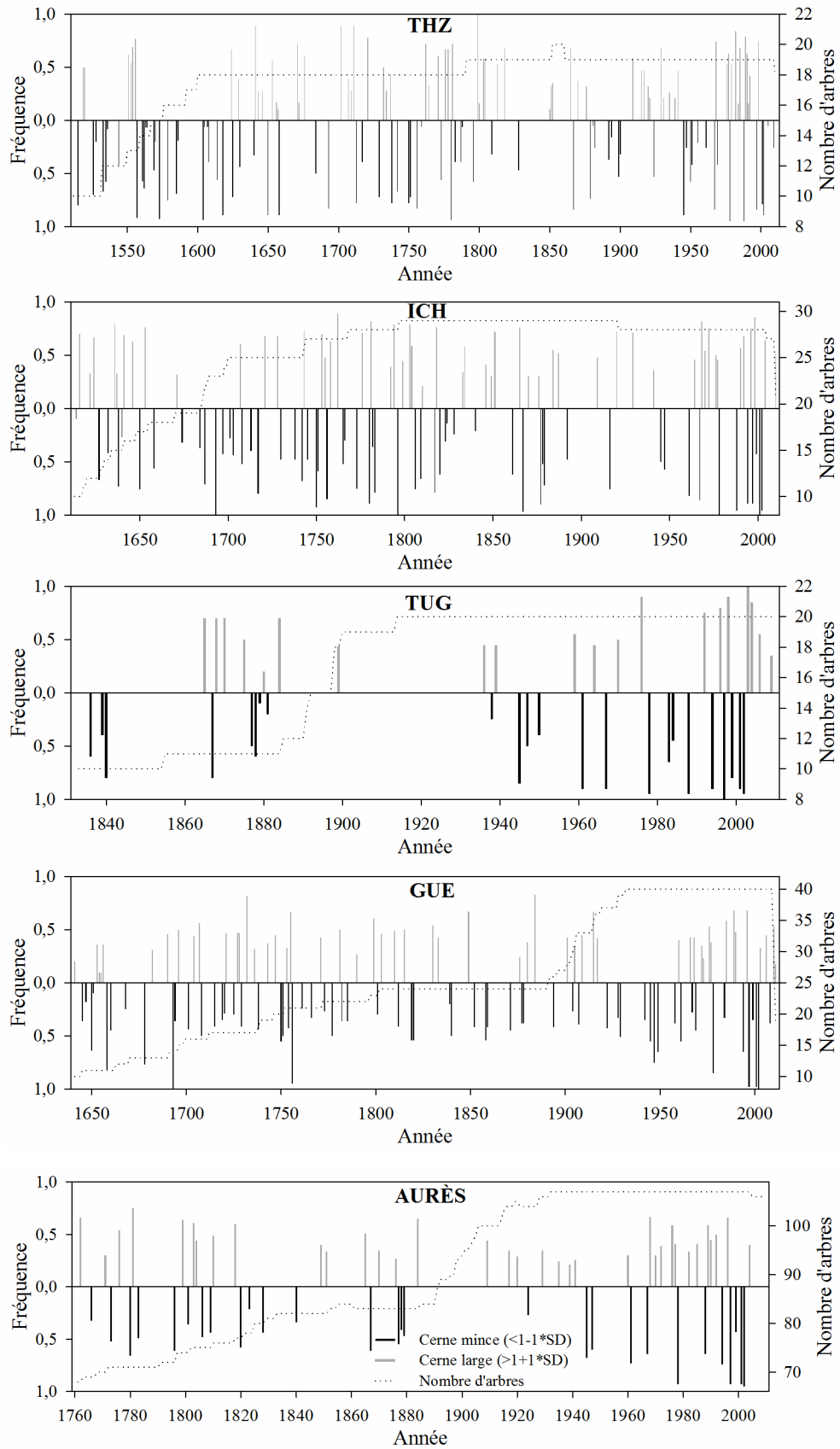


Figure 4.3. Fréquences relatives en cerne épais et minces pour la région des Aurès.

Par ailleurs, l'évolution de la fréquence relative des chronologies en cernes minces montre une augmentation très hautement significative sur l'ensemble de la période d'analyse ($n = 28$, $p < 0,001$). Sur la période commune 1761-2009, 9 sur 10 des fréquences les plus élevées en cernes minces ont été enregistrées entre 1945 et 2002. Le cerne a été mince dans 93 % des arbres sondés pour les années 1978, 1997 et 2001 et dans 95 % des arbres en 2002. Sur la même période ont été enregistrées 4 des 10 fréquences les plus élevées en cernes larges (1968, 1976, 1989 et 1996). Néanmoins, la fréquence maximale a été enregistrée en 1781, pour laquelle 75 % des arbres sondés ont montré une croissance très élevée.

4.3.1.2. Croissance radiale au niveau de la région de Kabylie

Comparée aux chronologies de la région des Aurès, les chronologies de la région de Kabylie affichent une variabilité interannuelle de l'indice de croissance relativement faible, mais avec une meilleure synchronisation des patrons de croissance (fig. 4.4). L'amplitude de la fluctuation de l'indice de croissance pour la période commune entre les quatre sites est plus importante à Tigounatine. La variabilité la plus faible est enregistrée à Djamaa Tighrifine.

Les dernières décennies ont été marquées par une variabilité de l'indice de croissance relativement élevée. Cependant, si cette période s'est étalée à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle dans la région des Aurès, elle n'est nette et continue qu'à partir des années 1990 pour la région de Kabylie. Les taux d'indices de croissance inférieurs à la moyenne sont moins élevés par rapport à ceux signalés pour la région des Aurès : 19 % à Tigounatine, 28 % à Refuge Amirouche, 40 % à Djamaa Tighrifine et 49 % à Lfidh Mohand Ouali. Le plus faible indice de croissance a été enregistré en 2002 à Refuge Amirouche, Djamaa Tighrifine et Lfidh Mohand Ouali. La chronologie de Tigounatine a aussi été marquée par une croissance très faible en 2002. Mais l'indice le plus bas a été enregistré en 1817. La croissance maximale a été observée en 1813 à Tigounatine, 1996 à Refuge Amirouche, 1998 à Djamaa Tighrifine et en 2008 à Lfidh Mohand Ouali.

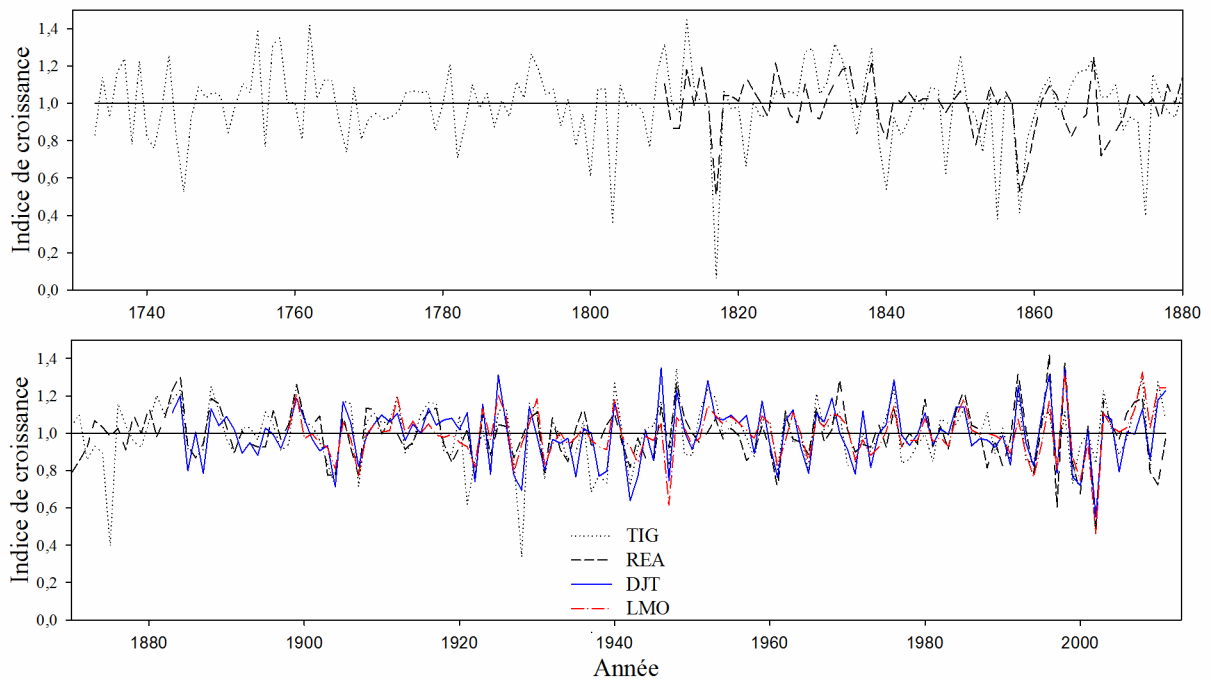


Figure 4.4. Chronologies maîtresses résiduelles au seuil d'EPS de 0,85 pour la région de Kabylie.

Le tableau 4.2 montre que les corrélations entre les différents sites sont très hautement significatives et supérieures à celles signalées pour la région des Aurès. Cette corrélation est très variable dans le temps et affiche des coefficients positifs sur toutes les périodes d'analyses (fig. 4.5). Les plus faibles corrélations ont été obtenues vers le début et la fin du xvii^e siècle entre les chronologies de Refuge Amirouche et Tigounatine. Par la suite, les corrélations retrouvent des niveaux plus élevés, avec une amplitude de variabilité moins prononcée à partir de la fin du xix^e siècle et début du xx^e siècle, où est enregistré un premier pic. Les deux dernières décennies ont été caractérisées par de fortes corrélations entre les sites d'étude, avec notamment des coefficients de corrélation les plus élevés entre les chronologies de Djamaa Tighrifine et Refuge Amirouche, Lfidh Mohan Ouali et Djamaa Tighrifine, et Lfidh Mohan Ouali et Refuge Amirouche.

Tableau 4.2. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies résiduelles des cédraies de la région de Kabylie. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson (r), le nombre d'observations (n) et la valeur p.

		TIG	REA	DJT
REA	r	0,56		
	n	202		
	p	0,000		
DJT	r	0,73	0,66	
	n	129	129	
	p	0,000	0,000	
LMO	r	0,64	0,67	0,79
	n	114	114	114
	p	0,000	0,000	0,000

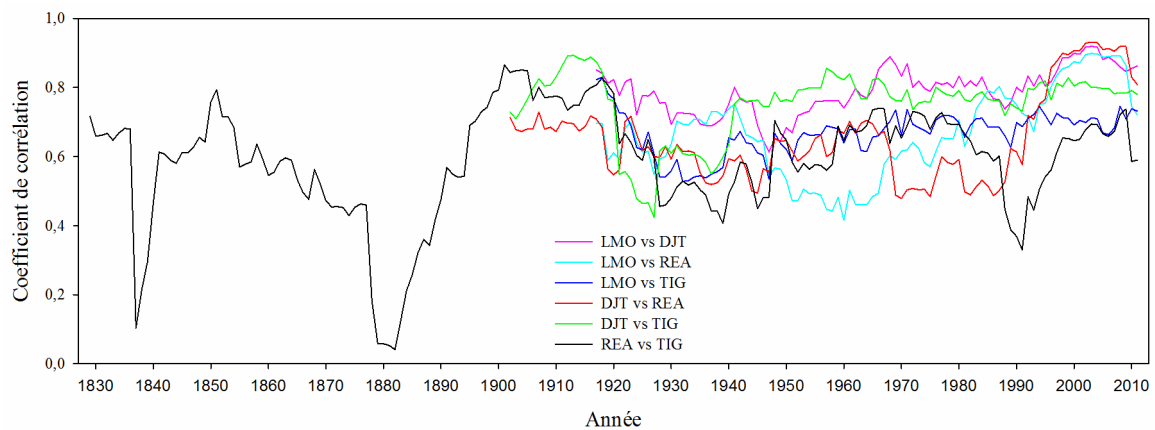


Figure 4.5. Évolution de la corrélation entre les chronologies résiduelles pour la région de Kabylie. Le coefficient de corrélation de Pearson est calculé sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

Les fréquences relatives des chronologies en cernes minces et larges sont présentées dans la figure 4.6. La chronologie de Lfidh Mohand Ouali a enregistré 42 cernes larges et 32 cernes minces sur 108 années entre 1904 et 2011. Sur 123 années, entre 1889 et 2011, 38 ont enregistré un cerne large et 35 un cerne mince à Djamaa Tighrifine. La chronologie de Tigounatine, qui est la plus longue de notre aire d'étude, affiche 78 cernes larges et 58 cernes minces sur 276 années entre 1736 et 2011. Enfin, 54 cernes larges et 46 cernes minces ont été identifiés sur la chronologie de Refuge Amirouche sur 200 années entre 1812 et 2011.

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

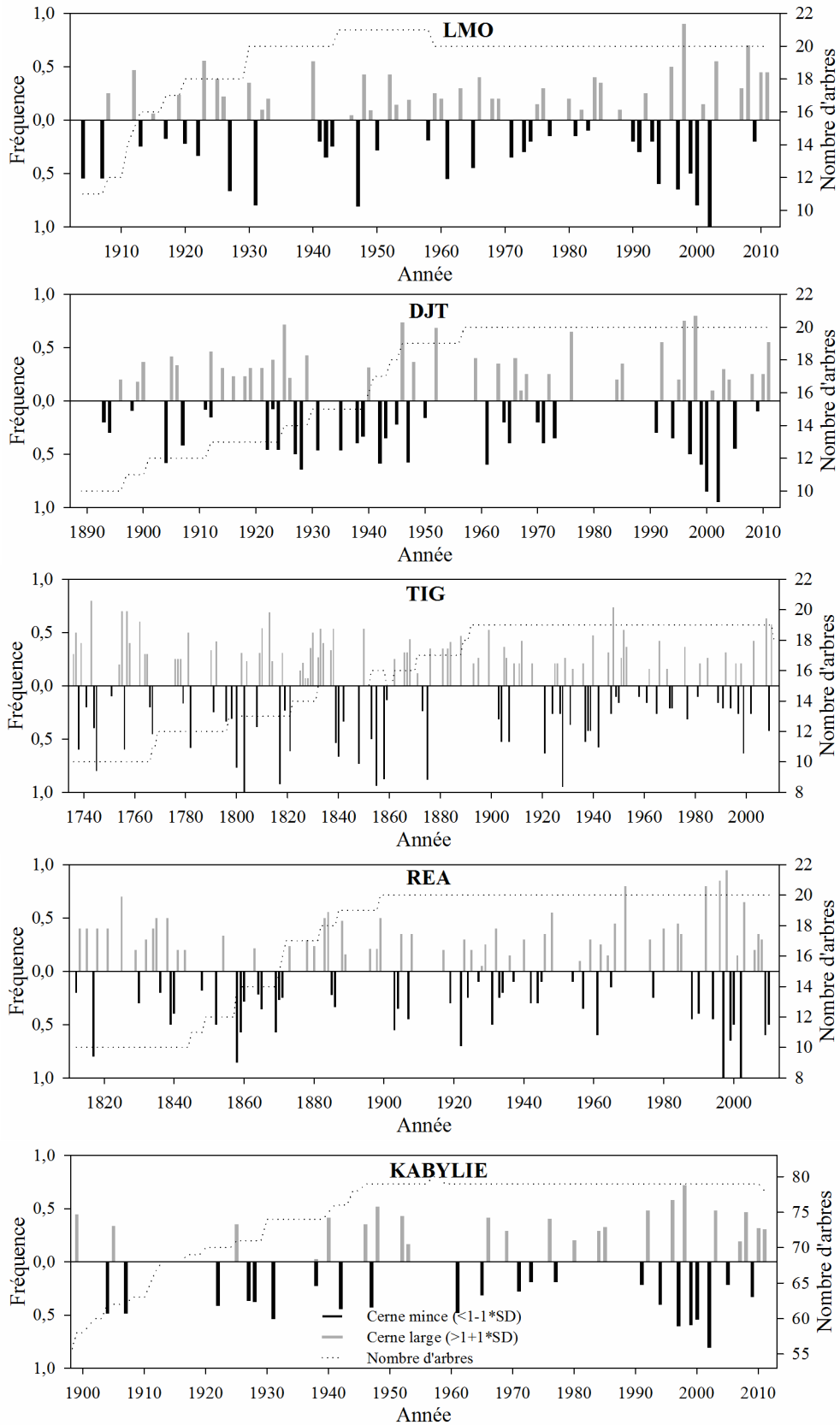


Figure 4.6. Fréquences relatives en cernes épais et minces pour la région de Kabylie.

La combinaison des quatre sites en une chronologie moyenne régionale, sur la période commune 1898-2011, montre que 23 années ont produit un cerne large et 28 autres ont été caractérisées par un cerne mince.

Les années caractérisées par une croissance extrême identifiées sur les chronologies des quatre sites d'étude et la chronologie régionale affichent une très bonne synchronisation. Le nombre et les fréquences les plus élevés, aussi bien pour les cernes larges que minces ont été enregistrés au cours des deux dernières décennies, excepté pour la chronologie de Tigounatine. Les résultats obtenus sur la chronologie moyenne pour l'ensemble des quatre sites montrent que les fréquences maximales ont été enregistrées lors des années 1998 et 2002. En 1998 le cerne a été large sur 72 % des arbres sondés. La fréquence est encore plus élevée pour l'année 2002 qui a enregistré un cerne mince sur 81 % des arbres échantillonnés.

4.3.2. Évolution spatiotemporelle de la variance commune de la croissance entre les arbres

4.3.2.1. Variance commune de la croissance au niveau de la région des Aurès

L'évolution spatiotemporelle des variances exprimées par les trois premières composantes principales est présentée dans la figure 4.7. Comme mentionné dans le chapitre précédent, seule la CP1, exprimant la plus forte variabilité commune de la croissance entre les quatre chronologies, est significative. La CP2 et la CP3 affichent des variances faibles et leurs évolutions sont plus ou moins opposées à la CP1.

L'évolution de la variance expliquée par la CP1 montre une grande variabilité temporelle au niveau des quatre sites. Ces derniers présentent une tendance d'évolution très comparable, avec notamment des pics de la variance enregistrés au cours des mêmes périodes. Néanmoins, c'est à partir du xx^e siècle que cette similarité est plus nette.

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

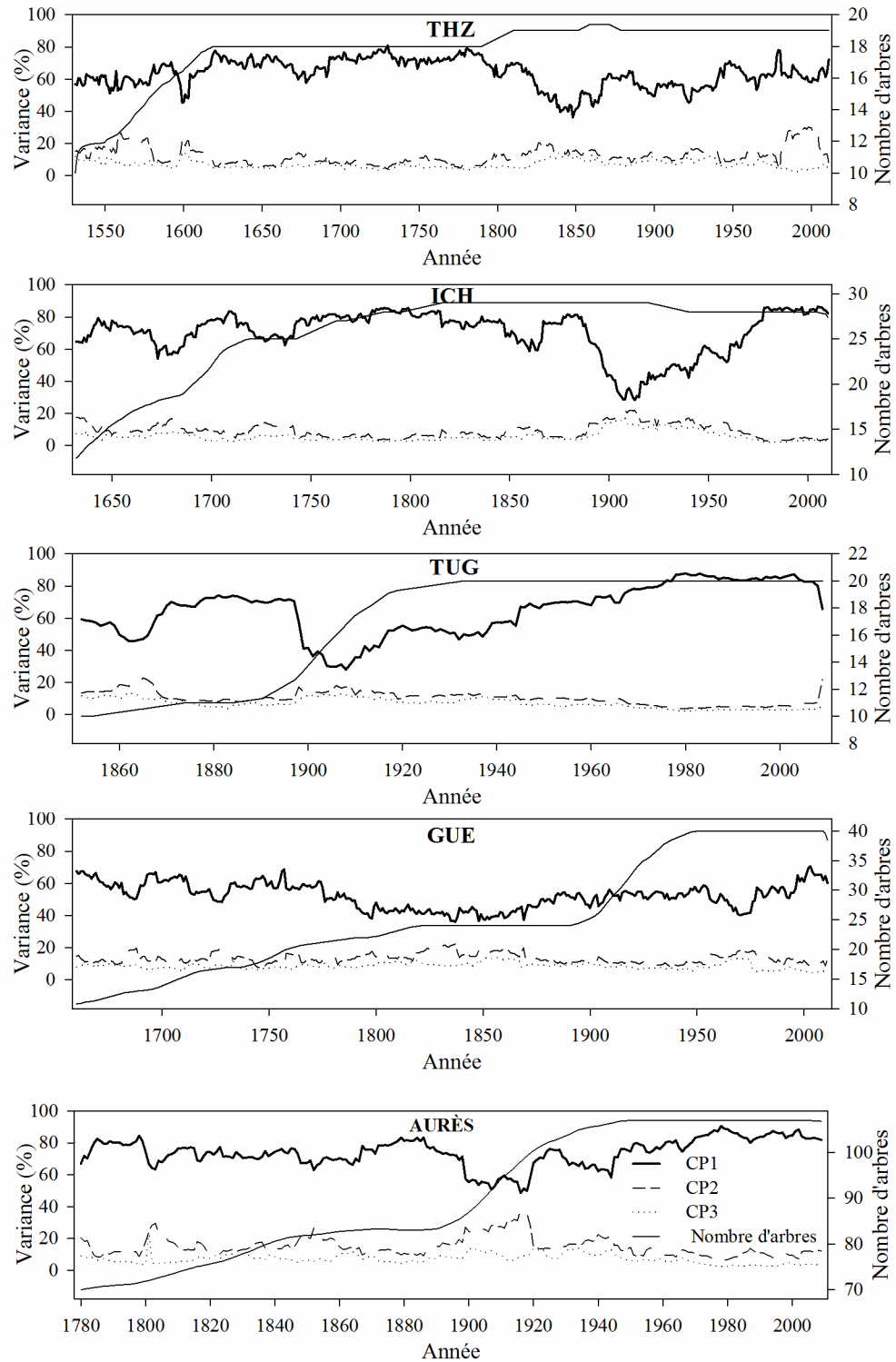


Figure 4.7. Évolution spatiotemporelle de la variance exprimée par les trois premières composantes principales (CP1, CP2 et CP3) pour la région des Aurès. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

L'examen de la courbe d'évolution de la CP1 exprimant la variance commune entre les quatre sites de la région des Aurès met en évidence cinq principaux pics, enregistrés sur les intervalles 1766-1785 (82,58 %), 1779-1798 (84,45 %), 1867-1886 (83,32 %), 1959-1978 (90,67 %) et 1993-2002 (88,31 %), coïncidant avec les valeurs les plus basses de la variance expliquée par la CP2 et la CP3. Le niveau le plus bas de la variance expliquée par la CP1 a été enregistré durant l'intervalle 1897-1916 (48,66 %). Il correspond à la variance expliquée par la CP2 la plus élevée (37,37 %). En outre, une régression linéaire sur la période 1945-2009 montre une augmentation significative de la variance expliquée par la CP1 ($p < 0,001$).

Par ailleurs, aucune relation significative n'a été observée entre le cumul moyen des précipitations reconstruites d'octobre à juin et la variance expliquée par la CP1 pour la région des Aurès. Cependant, la CP1 montre une corrélation positive et très hautement significative avec le coefficient de variation de ces précipitations (fig. 4.8).

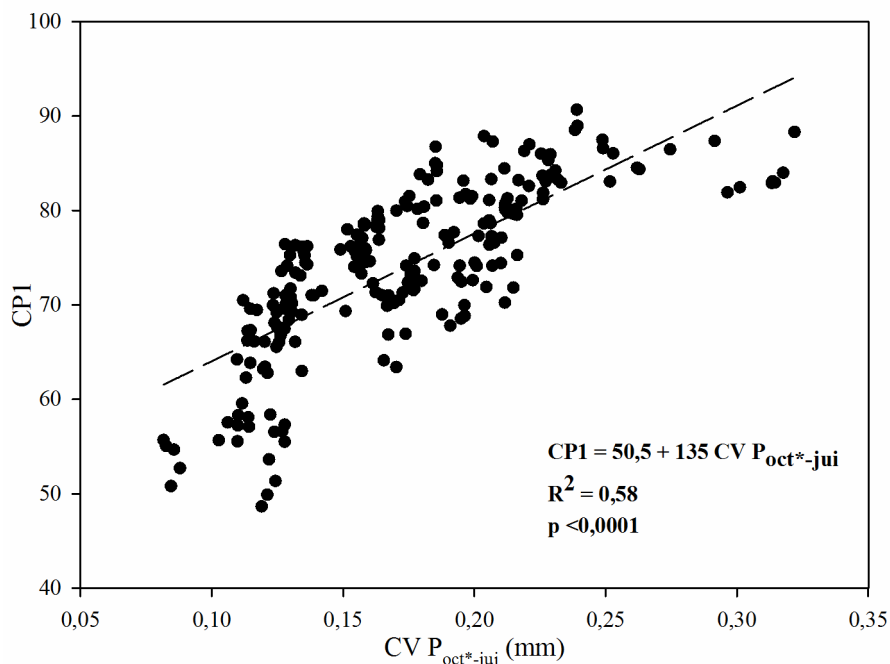


Figure 4.8. Relation entre la CP1 et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct*-juin}$) pour la région des Aurès. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année.

4.3.2.2. Variance commune de la croissance au niveau de la région de Kabylie

La figure 4.9 présente l'évolution spatiotemporelle des variances exprimées par les trois premières composantes principales pour la région de Kabylie.

Comme dans le cas de la région des Aurès, seule la CP1 est significative sur tous les intervalles d'analyses. La variance expliquée par la CP1 est légèrement supérieure au niveau de la région de Kabylie, notamment pour les valeurs minimales. Les quatre sites de la région de Kabylie montrent une variabilité temporelle plus ou moins importante. La variance expliquée par la CP1 a été marquée par une augmentation significative dans le temps pour les sites de Lfidh Mohand Ouali, Djamaa Tighrifine ($p < 0,001$) et Refuge Amirouche ($p < 0,05$). Notons que sur la période commune 1898-2011 tous les sites ont enregistré un maximum de la variance expliquée par la CP1 au cours des dernières décennies.

L'évolution de la CP1 exprimant la variance commune entre les quatre sites de la région de Kabylie affiche une augmentation très hautement significative sur la période totale d'analyse ($p < 0,001$). La courbe est caractérisée par une première période relativement stable, entre 1898 et le début des années 1990, à partir desquelles a commencé une phase marquée par une augmentation brutale de la variance. Le maximum a été enregistré sur l'intervalle 1983-2002 avec une variance de l'ordre de 90,68 %, correspondant au niveau le plus bas de la variance enregistrée par la CP2. De même, le niveau le plus bas de la variance expliquée par la CP1, observé lors de l'intervalle 1908-1927 (68,68 %), correspond au niveau le plus élevé de la variance enregistrée par la CP2 (19,35 %).

Par ailleurs, comme pour le cas de la région des Aurès, la régression linéaire montre une corrélation positive et très hautement significative entre la CP1 et le coefficient de variation des précipitations reconstruites (fig. 4.10).

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

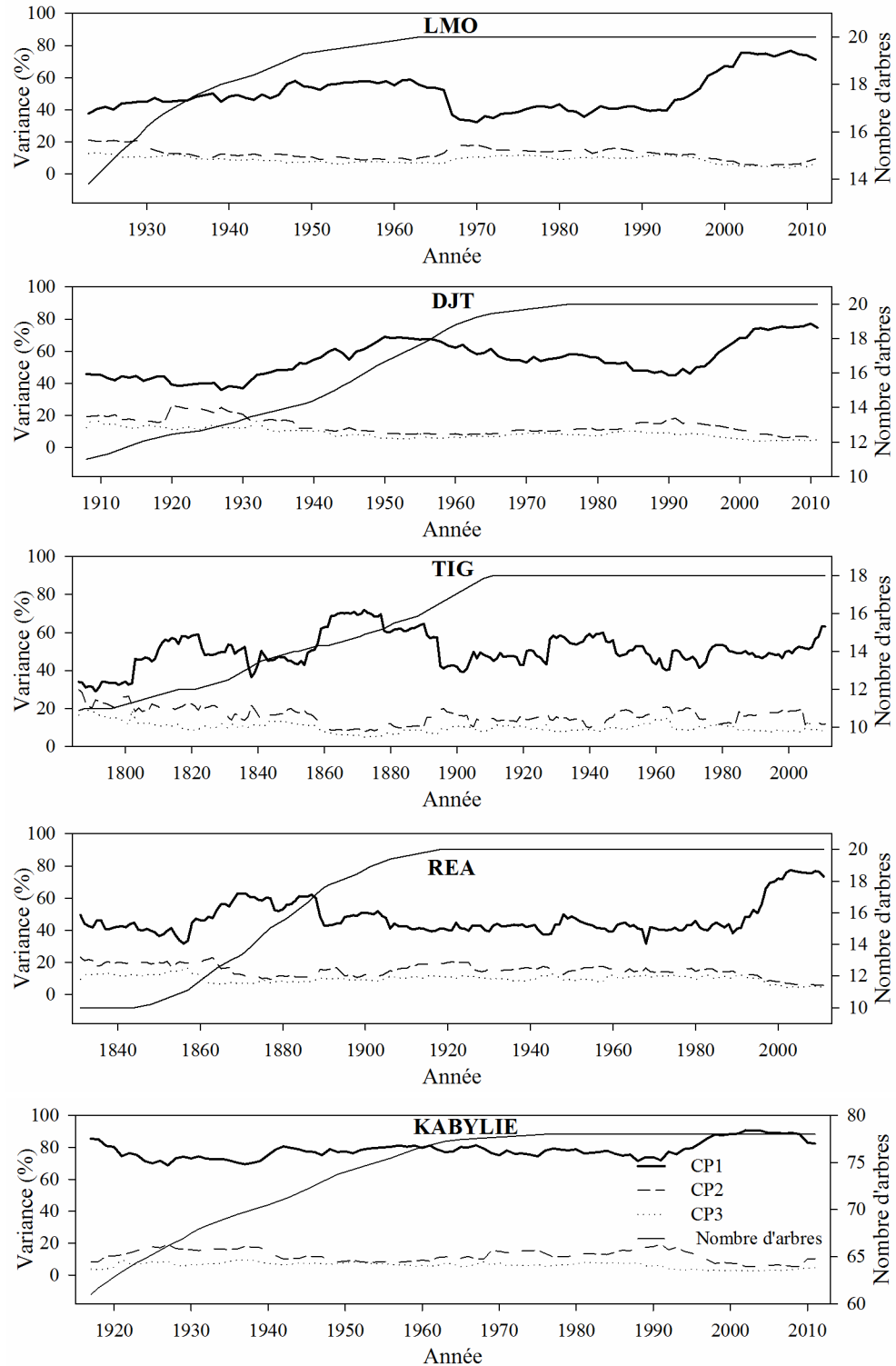


Figure 4.9. Évolution spatiotemporelle de la variance expliquée par les trois premières composantes principales (CP1, CP2 et CP3) pour la région de Kabylie. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

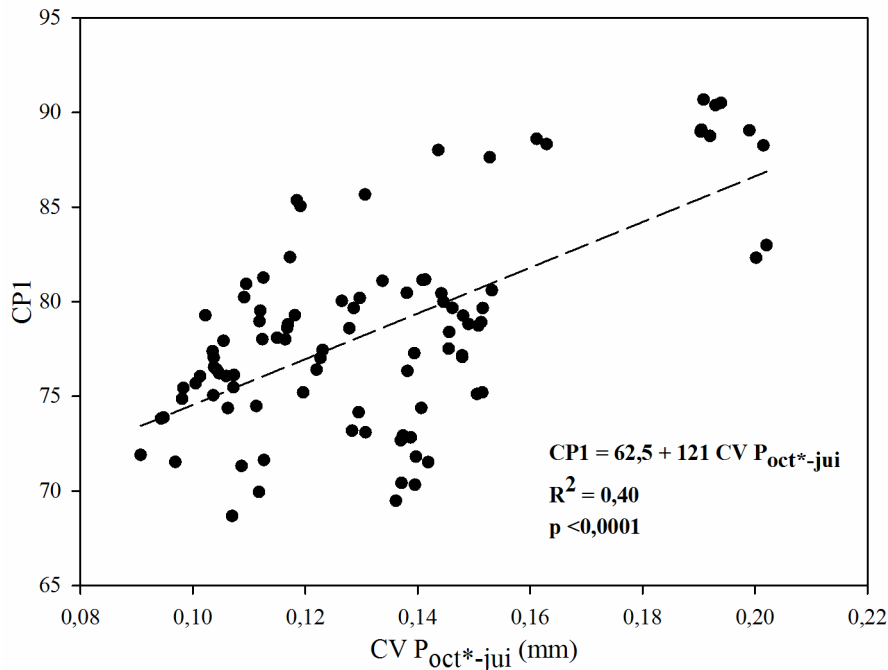


Figure 4.10. Relation entre la CPI et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct*-jui}$) pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année.

La figure 4.11 montre la tendance d'évolution dans le temps de la variabilité commune de la croissance entre les huit sites échantillonnés sur l'ensemble de nos deux régions d'étude. Les résultats montrent une augmentation très hautement significative de la variance expliquée par la CPI sur la période commune 1898-2009, avec une diminution concomitante des variances expliquées par les CP2 et CP3. La courbe de la CPI est marquée par une période de relative stabilité entre les intervalles 1910-1929 et 1926-1945. Par la suite, elle reprend son ascension pour enregistrer trois pics principaux. Le premier est survenu sur l'intervalle 1945-1964 avec une variance de l'ordre de 71,13 %, le deuxième sur l'intervalle 1959-1978 avec une variance de 80,54 %, et, enfin, un troisième et dernier pic est observé lors de l'intervalle 1983-2002 avec une variance maximale observée sur toute la période d'analyse de l'ordre de 80,94 %. Les dernières années sont marquées par une légère diminution de la variance, mais avec des valeurs très élevées.

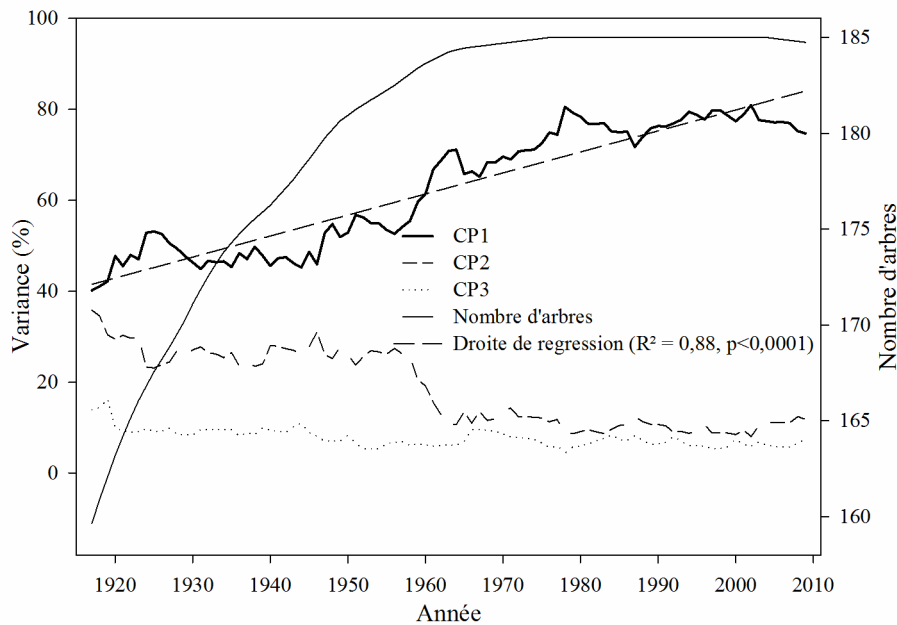


Figure 4.11. Évolution dans le temps de la variance exprimée par les trois premières composantes principales (CP1, CP2 et CP3) impliquant les huit sites échantillonnés dans nos deux régions d'étude sur la période commune 1898-2009. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

4.3.3. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne

4.3.3.1. Variabilité de la sensibilité moyenne au niveau de la région des Aurès

La figure 4.12 présente l'évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne pour la région des Aurès. La variabilité temporelle de la sensibilité moyenne a été plus importante au niveau des cédraies de Thniet Zemroune et Ichmoul. Néanmoins, les quatre sites présentent une tendance d'évolution similaire, avec une augmentation significative de la sensibilité moyenne sur leur période commune 1761-2009 ($p < 0,001$), très comparable à celle observée pour l'ensemble de la région. Cette dernière montre une courbe relativement stable jusqu'à la fin de la première moitié du xx^e siècle. Au cours de cette période, la valeur maximale de la sensibilité moyenne a été de l'ordre de 0,31, enregistrée sur l'intervalle 1866-1885.

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

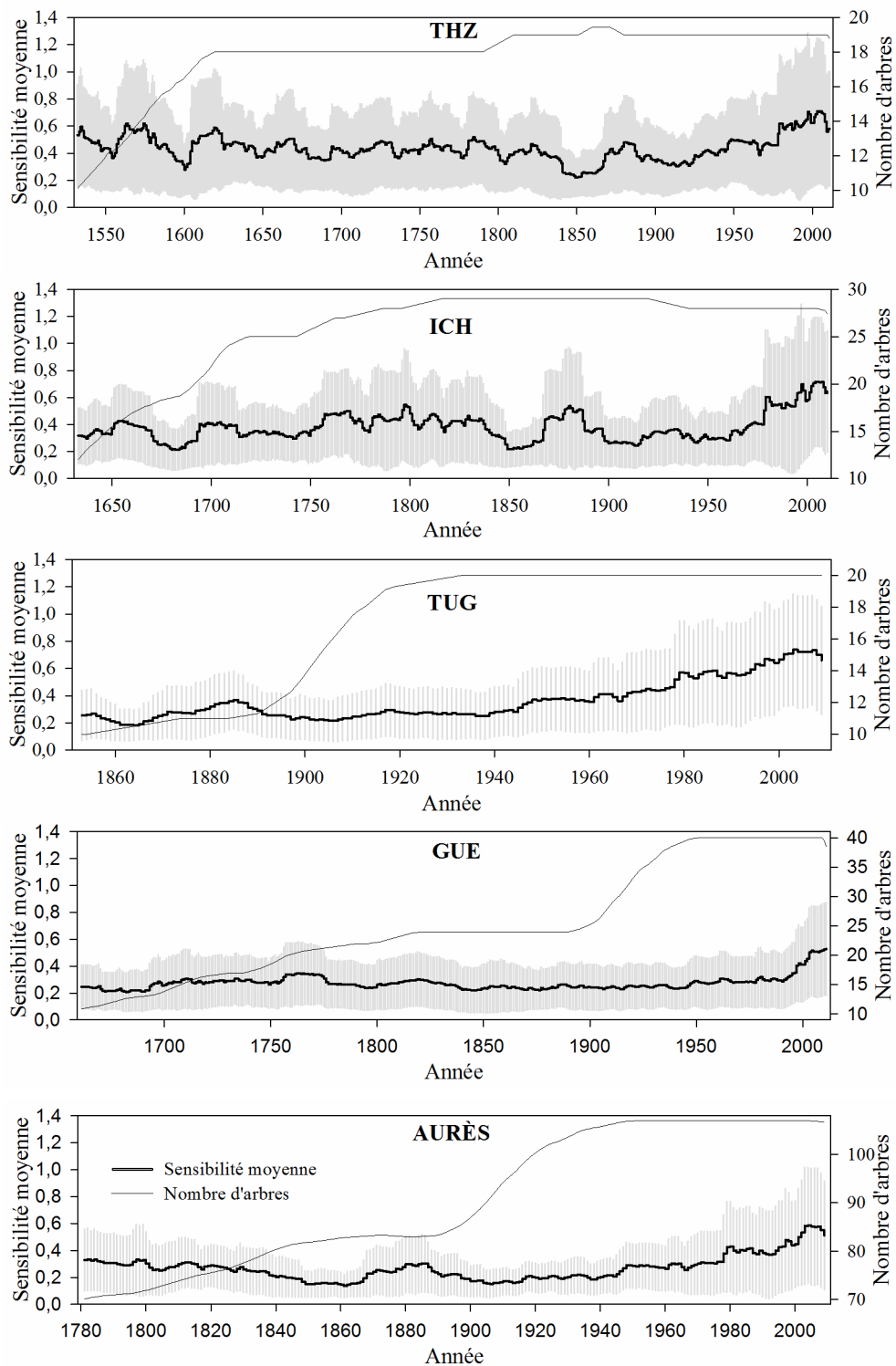


Figure 4.12. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne pour la région des Aurès. Les barres verticales représentent l'écart type. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

À partir du milieu des années 1940 la sensibilité des arbres sondés a accusé une augmentation très hautement significative ($p < 0,001$). À deux reprises cette augmentation a été brusque entre deux intervalles moyens successifs. La première a été observée entre les intervalles 1958-1977 et 1959-1978, où la valeur de la sensibilité moyenne est passée de 0,32 à 0,38. La seconde a été obtenue entre les intervalles 1983-2002 et 1984-2003, avec une valeur passant de 0,53 à 0,58, avant d'atteindre un maximum de 0,59 sur l'intervalle 1985-2004. Le niveau le plus bas de la sensibilité moyenne a été enregistré sur les deux intervalles successifs 1841-1860 et 1842-1861 avec une valeur de 0,14.

Comme pour la CP1, une corrélation positive et très hautement significative a été observée entre la sensibilité moyenne et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin (fig. 4.13).

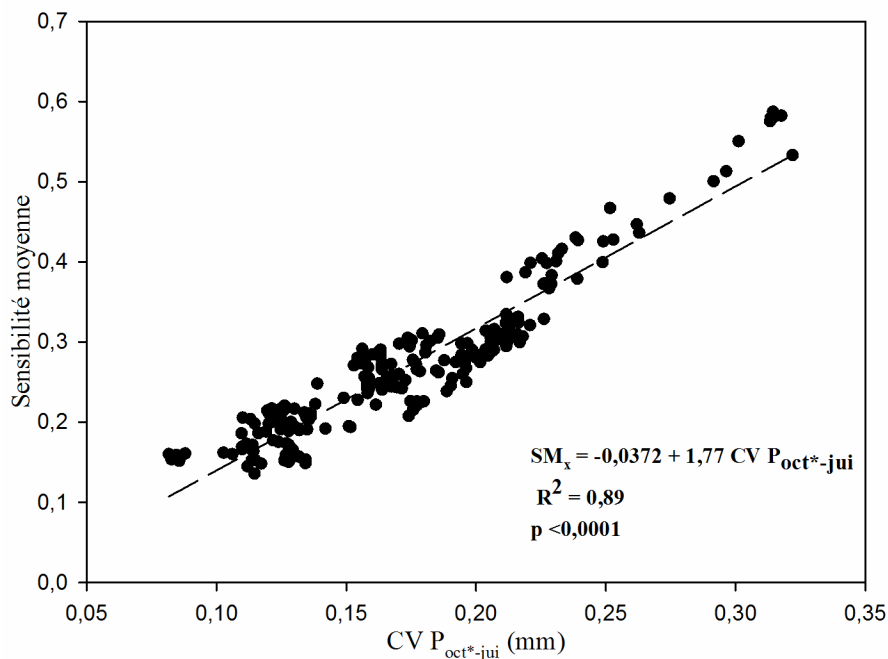


Figure 4.13. Relation entre la sensibilité moyenne (SM_x) et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct^*-jui}$) pour la région des Aurès. L'astérisque (*) indique le mois de l'année t-1. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année.

4.3.3.2. Variabilité de la sensibilité moyenne au niveau de la région de Kabylie

La figure 4.14 montre que la sensibilité moyenne de la région de Kabylie est inférieure à celle rapportée pour la région des Aurès sur toutes les périodes d'analyse communes. Des quatre sites d'étude, seule la courbe de la chronologie de Tigounatine a montré une grande variabilité dans le temps. Par ailleurs, une augmentation de la sensibilité moyenne a été enregistrée au cours des dernières décennies au niveau de tous les sites.

L'examen de la courbe calculée sur l'ensemble des sites de la région de Kabylie montre une allure plus ou moins stable avec une légère augmentation de la sensibilité moyenne sur l'ensemble de la période d'analyse. Néanmoins, cette augmentation n'est pas significative. Les niveaux les plus élevés de la sensibilité moyenne ont été enregistrés sur les intervalles 1923-1942 et 1984-2003 à 1987-2006 avec une valeur de 0,30 et sur les deux derniers intervalles successifs 1991-2010 et 1992-2011 avec une valeur maximale de 0,32.

Par ailleurs, la régression linéaire simple présentée par la figure 4.15 montre que la corrélation entre la sensibilité moyenne et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin est positive et très hautement significative.

L'évolution dans le temps de la sensibilité moyenne calculée sur l'ensemble de nos deux régions d'étude est présentée dans la figure 4.16. Les résultats montrent une augmentation très hautement significative de la sensibilité moyenne sur la période totale d'analyse. Trois principaux pics sont à signaler. Le premier a été observé sur l'intervalle 1929-1948 avec une valeur de 0,29. Cette dernière est passée de 0,28 à 0,31 entre les intervalles 1958-1977 et 1959-1978, avant d'enregistrer un autre pic avec une valeur de l'ordre de 0,33 sur les deux intervalles successifs 1960-1979 et 1961-1980. Une autre augmentation brutale de la sensibilité moyenne, passant de 0,40 à 0,44, a été observée entre les intervalles 1983-2002 et 1984-2003 à partir desquels a été enregistré le troisième et dernier pic, formant un palier sur les intervalles 1984-2003 à 1988-2007.

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

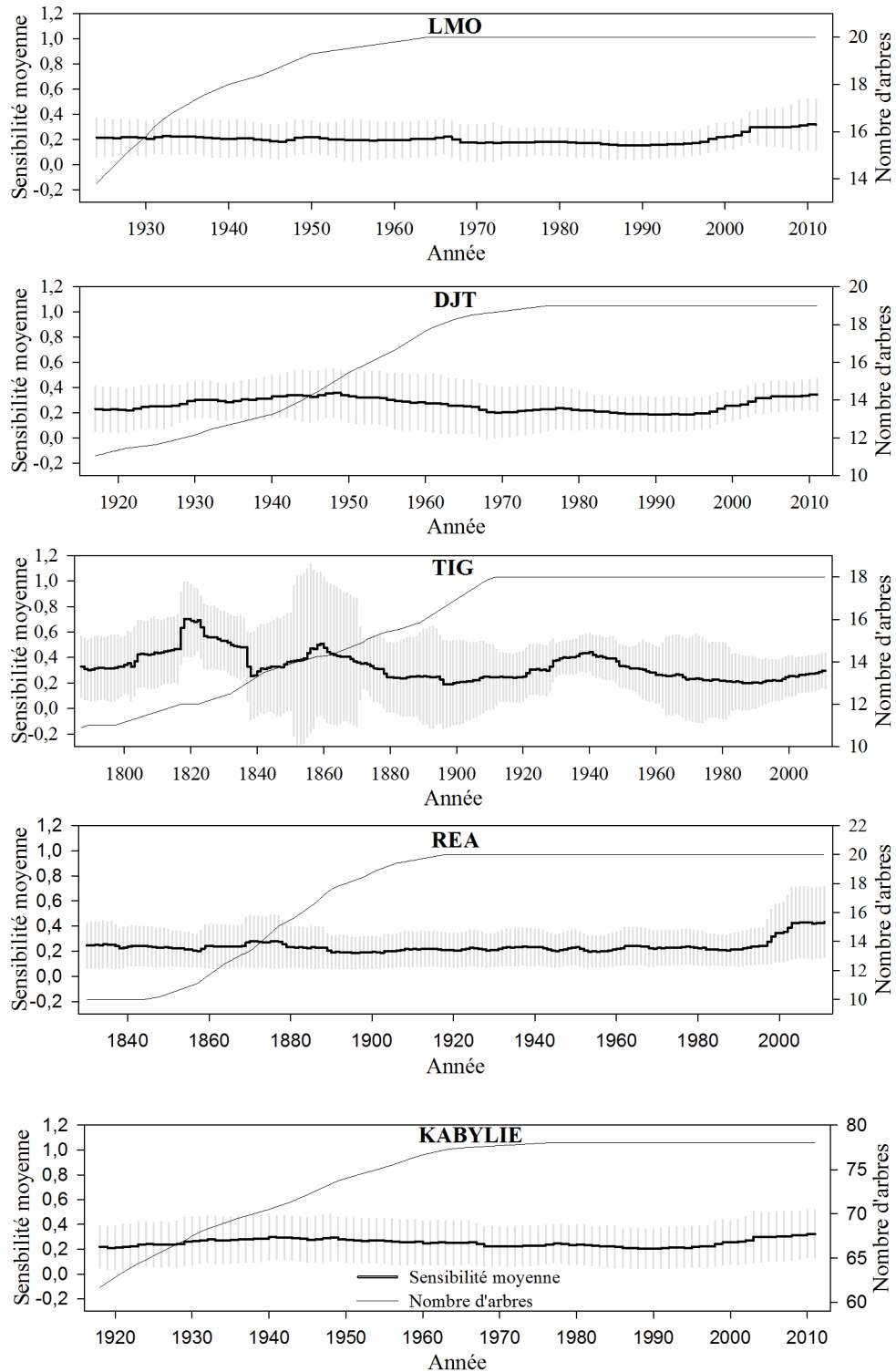


Figure 4.14. Évolution spatiotemporelle de la sensibilité moyenne pour la région de Kabylie. Les barres verticales représentent l'écart type. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

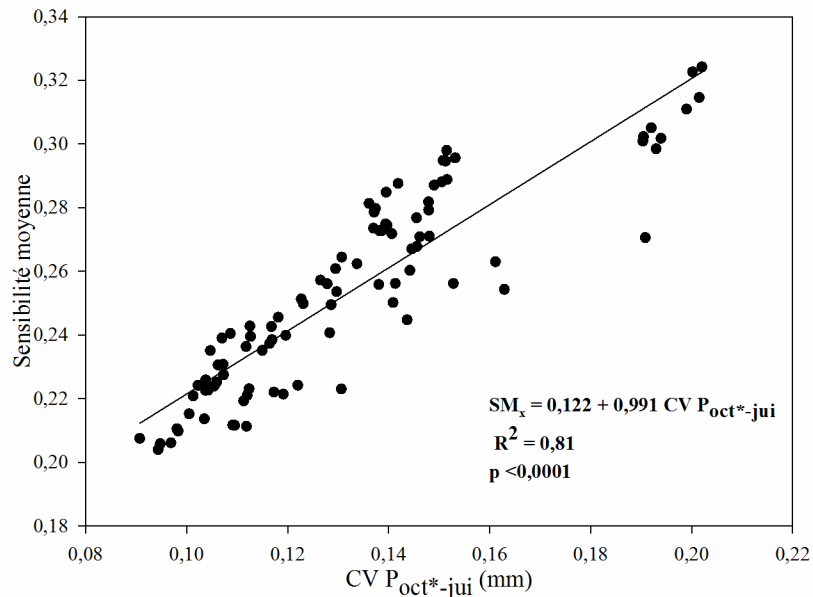


Figure 4.15. Relation entre la sensibilité moyenne (SM_x) et le coefficient de variation des précipitations reconstruites d'octobre à juin ($CV P_{oct^*-juin}$) pour la région de Kabylie. L'astérisque (*) indique le mois de l'année $t-1$. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année.

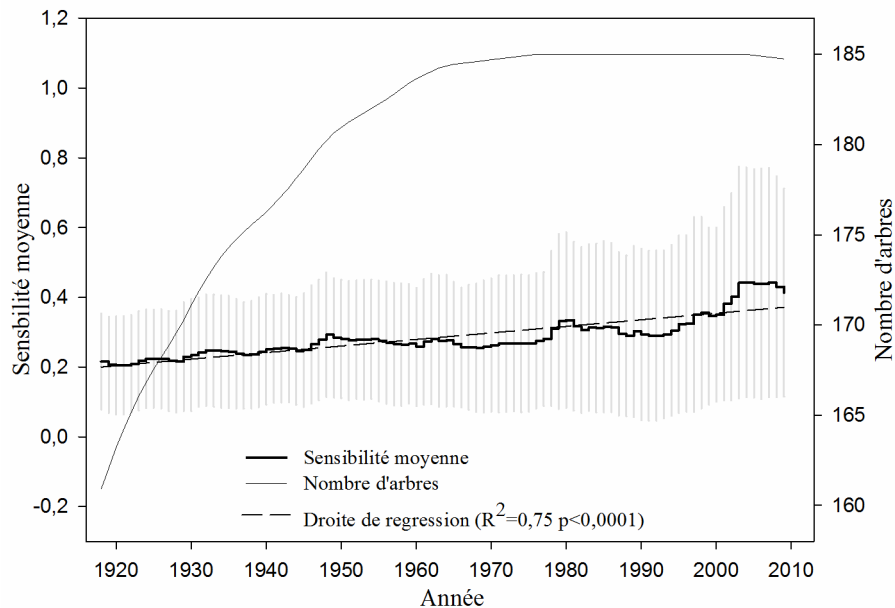


Figure 4.16. Évolution dans le temps de la sensibilité moyenne impliquant les huit sites de nos deux régions d'étude sur la période commune 1898-2009. Les barres verticales représentent l'écart type. Les calculs sont effectués sur une moyenne mobile de 20 ans décalés d'une année. Les moyennes sont présentées sur la dernière année de chaque période.

4.4. Discussion

4.4.1. Variabilité de la croissance radiale

Les chronologies de nos deux régions d'étude ont montré une haute variabilité interannuelle de la croissance radiale, notamment lors des dernières décennies (fig. 4.1 et 4.4). La région des Aurès a enregistré le plus haut degré de variabilité de la croissance observé sur une longue période à partir du milieu des années 1940. Cette tendance est aussi nette sur les deux dernières décennies pour la région de Kabylie. Ceci est confirmé par le nombre très élevé de cernes avec une croissance extrême identifiés au cours de cette période (fig. 4.3 et 4.6), coïncidant avec la forte variabilité des précipitations reconstruites pour les deux régions d'étude.

Les plus fortes fréquences relatives des chronologies en cernes minces enregistrées au cours des dernières décennies confirment la tendance d'une évolution nette vers des conditions climatiques de plus en plus sèches, signalée dans le chapitre précédent et rapportée dans plusieurs études au niveau de la rive sud de la Méditerranée (Esper *et al.*, 2007 ; Touchan *et al.*, 2008a, 2008b, 2010 ; Linares *et al.*, 2011 ; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013).

Nos chronologies ont montré une très bonne synchronisation de la croissance. Dans l'ensemble, pour les deux régions d'étude la corrélation entre les sites a été faible lors des périodes humides (annexe 3.12), caractérisées par des cernes de croissance plus ou moins larges. Au contraire, les pics du coefficient de corrélation entre les chronologies ont été associés à des périodes de sécheresse (annexe 3.11) caractérisées par une croissance faible exprimée par un cerne mince. Ainsi, la similarité des patrons de croissance des sites étudiés est d'autant plus élevée que les conditions climatiques sont plus contraignantes à la croissance. Le même résultat a été avancé par Andreu *et al.* (2007) pour plusieurs pinèdes de la péninsule Ibérique.

4.4.2. Variance commune de la croissance

La variance expliquée par la CP1 au niveau d'un site donné, sur l'ensemble des sites pour une région ou pour tous les sites échantillonnés à travers nos deux régions d'étude, peut être interprétée comme la part de la variabilité de la croissance exprimée comme une réponse commune des arbres aux signaux climatiques (Tardif

et al., 2003). La variabilité commune de la croissance exprimée par nos chronologies est principalement influencée par la variabilité des précipitations. En effet, une corrélation positive et très hautement significative entre la CP1 et le coefficient de variation des précipitations reconstruites a été mise en évidence au niveau de nos deux régions d'étude (fig. 4.8 et 4.10), tandis qu'aucune relation significative n'a été observée entre la CP1 et le cumul moyen des précipitations sur les intervalles d'analyses considérés.

La variabilité commune de la croissance n'a pas été stable dans le temps (fig. 4.7, 4.9 et 4.11). Toutes les figures mettent en évidence que la croissance des arbres a été plus synchrone sous des conditions climatiques plus limitantes. Les différences entre les sites peuvent être imputées à l'influence des conditions microclimatiques. Les courbes relatives à la variabilité commune de la croissance dans chacune de nos régions d'étude et au niveau de l'aire comprenant l'ensemble des sites échantillonnés dans les deux régions expriment, quant à elles, les variabilités principalement influencées par les conditions méso- et macroclimatiques respectivement. Par ailleurs, les variances expliquées par la CP2 et la CP3 peuvent être attribuées aux influences d'autres facteurs locaux, telles que les caractéristiques physiques des sites et des régions d'étude et l'état des cédraies échantillonnées, qui n'ont pas été totalement éliminées par la procédure de la standardisation des séries chronologiques. Ainsi, l'augmentation substantielle de la variance expliquée par la CP1 au cours du xx^e siècle, période caractérisée par des conditions de plus en plus contraignantes à la croissance des arbres, notamment à partir des années 1940, et une diminution des variances expliquées par la CP2 et la CP3, suggère une tendance à l'augmentation de la réponse commune des arbres aux conditions climatiques à plus grandes échelles, avec une diminution concomitante de l'influence des conditions de site et de peuplement. Macias *et al.* (2006) considèrent les changements de la variabilité commune de la croissance au niveau des forêts du sapin commun (*Abies alba*) du nord-ouest de l'Espagne au cours du xx^e siècle comme un fort signal du changement climatique qui a affecté cette région. Andreu *et al.* (2007) ont attribué la variabilité commune de la croissance, détectée entre 38

chronologies des principales espèces de pin de la péninsule Ibérique, au macroclimat.

Les pics de la variance expliquée par la CP1 coïncident avec des périodes sèches associées à de multiples épisodes de dépérissement du cèdre de l'Atlas. Cinq années sèches ont été identifiées sur la période relative aux premiers pics de la variabilité commune de la croissance entre les sites de la région des Aurès, survenus sur les intervalles 1766-1785 et 1779-1798 (annexe 3.11). Le pic signalé sur l'intervalle 1867-1886 se recoupe avec une période d'extrême sécheresse, suivie d'un épisode de dépérissement forestier. Trois années consécutives sèches ont été observées entre 1877 et 1879 sur notre reconstruction des précipitations pour la région des Aurès. Touchan *et al.* (2008a) rapportent un indice de sévérité de la sécheresse de Palmer inférieur à la moyenne sur six années consécutives entre 1876 et 1881 au niveau de l'Afrique du Nord-Ouest. Par ailleurs, Boudy (1950) *in* Abdessemed (1981) signale qu'une période de sécheresse serait survenue entre 1875 et 1880, occasionnant le dépérissement de plusieurs peuplements de cèdre de l'Atlas dans la région des Aurès. Lapie (1909) note qu'une sécheresse exceptionnelle, combinée à un hiver rigoureux, a entraîné en 1879 et 1880 la mort de peuplements entiers de cèdre de l'Atlas dans l'Aurès et en Kabylie. Le Houérou (1980) rapporte qu'en 1881 la forêt algérienne a perdu 169 000 ha à cause d'une vague d'incendies associés à une sécheresse intense. Cette année a été signalée par Meddour-Sahar *et al.* (2008) comme l'une des plus catastrophiques de l'historique des feux de forêt en Algérie. Le pic de la variance expliquée par la CP1 enregistré sur l'intervalle 1959-1978 sur les figures 4.9 et 4.11 coïncide avec un autre épisode de dépérissement du cèdre de l'Atlas au niveau de la région des Aurès. Dans une étude documentée sur 88 formations forestières se développant sous différentes zones climatiques, Allen *et al.* (2010) notent que les dernières vagues de dépérissement sont principalement dues aux stress hydrique et thermique enregistrés depuis les années 1970. Notons que l'année 1978 est la deuxième année la plus sèche, après l'année 2002, de notre reconstruction des précipitations pour la région des Aurès. Selon Abdessemed (1981), la sécheresse ayant sévi en 1977 et 1978 dans la région des Aurès, pour lesquelles le déficit pluviométrique a atteint la moitié de la

moyenne, a entraîné un assèchement du chêne-vert, essence réputée des plus rustiques. L'auteur ajoute que c'est peut-être à cette sécheresse qu'est dû le dépérissement par pied du cèdre de l'Atlas observé au début des années 1980. Enfin, la plus haute variabilité commune de la croissance entre les arbres sondés a été enregistrée à la fin du xx^e siècle et début du XXI^e siècle, avec un pic sur l'intervalle comprenant l'année 2002, qui est l'année la plus sèche de nos reconstructions des précipitations pour les deux régions d'étude. Cette période, signalée comme la plus défavorable sur l'ensemble des périodes d'analyse (fig. 3.10 et 3.13), a été marquée par un autre épisode de dépérissement du cèdre de l'Atlas, qui a aussi touché d'autres essences forestières algériennes à l'image du chêne-vert, du pin d'Alep (*Pinus halepensis*), du chêne-liège (*Quercus suber*) et du genévrier thurifère. Néanmoins, le taux de mortalité des arbres a été largement supérieur au niveau de la région des Aurès (Allen *et al.*, 2010). Par ailleurs, les fortes valeurs de la variance expliquée par la CPI caractérisant les toutes dernières années de nos périodes d'analyse indiquent que les arbres subissent encore les conséquences d'une forte variabilité climatique, caractérisée par une période de sécheresse sans précédent.

4.4.3. Variabilité de la sensibilité moyenne

La sensibilité moyenne exprime la réaction des arbres aux changements des conditions de l'environnement affectant leur croissance (Biondi et Qeadan, 2008). Comme dans le cas de la variabilité commune de la croissance, la sensibilité moyenne des arbres sondés est principalement influencée par la variabilité des précipitations (fig. 4.13 et 4.15).

La sensibilité des arbres a été élevée sur les intervalles caractérisés par des pics de la variabilité commune de la croissance entre les sites et régions d'étude, associés à une forte variabilité des précipitations et de la croissance radiale. Une augmentation significative de la sensibilité moyenne a été observée à partir du début du xx^e siècle. Néanmoins, la tendance la plus prononcée a été enregistrée à partir de la décennie 1940, avec des niveaux de sensibilité moyenne très élevés vers la fin des années 1970 pour la région des Aurès et entre la fin du xx^e siècle et le début du XXI^e

siècle pour nos deux régions d'étude (fig. 4.12 4.14 et 4.16). Ces événements coïncident avec les deux derniers épisodes de dépérissement forestier rapportés dans la section précédente. Il en est de même pour l'autre épisode signalé pour la fin du xvii^e siècle. D'après Lenton *et al.* (2008), cette augmentation significative de la sensibilité moyenne depuis les années 1940 peut être considérée comme un signal d'alarme de l'approche de « points de rupture », exprimée ici par l'augmentation importante et brutale de la sensibilité moyenne vers la fin de la décennie 1970 et entre la fin des années 1990 et le début de la décennie 2000. Les épisodes de dépérissement signalés au cours des dernières décennies en Algérie (Abdessemed, 1981 ; Bentouati, 2008 ; Allen *et al.*, 2010) et au Maroc (El Abidine, 2003 ; Allen *et al.*, 2010 ; Linares *et al.*, 2011) peuvent être vus comme des « éléments de basculement » (Lenton *et al.*, 2008), par rapport à des seuils de croissance des arbres dont le développement est de plus en plus influencé par des conditions climatiques à grandes échelles. Des résultats comparables ont été rapportés par Andreu *et al.* (2007) pour le nord-ouest espagnol. De même, dans le nord du Maroc, Linares *et al.* (2011) signalent une augmentation de la fréquence de la sécheresse à partir des années 1970 et une chute sensible du taux de croissance, associée à une augmentation de la sensibilité des peuplements de cèdre de l'Atlas vis-à-vis de la sécheresse à partir de la fin des années 1980.

Dans l'ensemble, les trois paramètres analysés montrent une tendance similaire à celle rapportée par le GIEC (2007) pour la variation observée de la température moyenne à la surface du globe (annexe 4.1). En effet, comme signalé pour la variabilité de la croissance radiale, la variance expliquée par la CP1 et la sensibilité moyenne, la température moyenne du globe terrestre affiche une augmentation sensible à partir du début du xx^e siècle. Cette augmentation est encore plus spectaculaire à partir de la deuxième moitié de ce siècle, caractérisée par une hausse brutale vers la fin des décennies 1970 et 1990, coïncidant avec les derniers épisodes de dépérissement forestiers signalés dans nos régions d'étude. Ceci confirme l'effet du réchauffement global sur la régression de l'aire naturelle du cèdre de l'Atlas.

4.5. Conclusion

Cette étude a trait à l'analyse de la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique, via une approche dendrochronologique.

Nos chronologies sont caractérisées par une forte variabilité de la croissance sur l'ensemble des périodes d'analyses considérées. Cependant, la variabilité la plus élevée a marqué les dernières décennies, coïncidant avec la plus haute variabilité des précipitations reconstruites pour les deux régions d'étude et une augmentation des fréquences relatives des chronologies en cernes diagnostiques, notamment des cernes minces, corroborant la nette tendance d'une évolution vers des conditions climatiques de plus en plus sèches. Une forte synchronisation entre les patrons de croissance a été observée lors des périodes caractérisées par ces conditions limitantes. En effet, c'est au cours des périodes sèches qu'ont été enregistrées les plus fortes corrélations entre les séries d'indices de croissance. Il en est de même pour la variabilité commune de la croissance et la sensibilité moyenne, essentiellement influencées par la variabilité des précipitations.

L'impact de la variabilité climatique sur la croissance du cèdre de l'Atlas a été plus prononcé au niveau de la région des Aurès, située à la limite méridionale de l'aire de distribution naturelle de l'espèce en Algérie. Cependant, nos résultats montrent que les conditions extrêmes sans précédent, observées au cours des dernières décennies au niveau de l'Afrique du Nord, ont engendré une forte augmentation du signal climatique commun entre les arbres sondés, traduite par une augmentation sensible de la réponse commune de ces derniers aux conditions méso- et macroclimatiques, avec une diminution concomitante des effets liés aux conditions locales de site et de peuplement.

Ainsi, si l'évolution de la variabilité climatique continue sur la tendance actuelle, des régions plus ou moins éloignées connaîtront des conditions climatiques de plus en plus similaires. Ceci pourrait conduire à une modification profonde, voire à la disparition par endroits, des conditions microclimatiques indispensables à la survie de l'espèce étudiée.

Cette étude se veut une contribution à l'appréhension de la réponse de nos essences forestières à la variabilité climatique passée et actuelle. Les éléments

IV. Réponse écologique du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique

apportés par cette recherche peuvent servir d'outils précieux à une gestion rationnelle et durable des ressources forestières, qui prenne en considération les enjeux et les perspectives qu'impliquent les changements climatiques actuels et futurs.

Chapitre V

Fire history of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) in mount Chélia, northern Algeria

Chapitre V

Fire history of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) in mount Chélia, northern Algeria

Published in:

Journal of Arid Environments 104 (2014) 116-123
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.02.008>
0140-1963/_ 2014 Elsevier Ltd.

S. Slimani^{a,d,*}, R. Touchan^b, A. Derridj^a, D. Kherchouche^c, E. Gutiérrez^d

^aFaculty of Biological Sciences and Agronomy. The University Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 15000, Algeria.

^bLaboratory of Tree Ring Research, The University of Arizona, 1215 E. Lowell St. Bldg. 45B, Tucson, AZ 85721, USA.

^cDepartment of Agronomy, Institute of Veterinary Science and Agronomy, The University Hadj Lakhdar, Batna 05000, Algeria.

^dDepartment of Ecology, Faculty of Biology, The University of Barcelona, Barcelona 08028, Spain.

*Corresponding author.

Email addresses: slimanisaid@yahoo.fr (S. Slimani), rtouchan@ltr.arizona.edu (R. Touchan), aderridj@yahoo.fr (A. Derridj), d.kherchouche@yahoo.fr (D. Kherchouche), emgutierrez@ub.edu (E. Gutiérrez).

Received 24 October 2013, Received in revised form 31 January 2014

Accepted 14 February 2014, Available online 15 March 2014

Abstract

The first fire history of the Atlas cedar forest of Chélia in northern Algeria is reconstructed from samples of 14 and 12 dead fire-scarred trees from lower and upper elevation stands respectively. Superposed epoch analysis is applied to summarize mean climate conditions before, during, and after sets of fire years in both stands. Prior to 1850, *C. atlantica* forests in both sites were characterized by

high frequency and low intensity fire regimes. The sharp decline in the fire frequency after the mid-nineteenth century coincided with the promulgation of the first laws governing land and forest use in Algeria. Most fire events occurred in the summer, during the latter part of the growing season. No significant relationships were found between an October-June precipitation reconstruction and fire events. This could be due to anthropogenic and topographic factors. The findings of this study provide baseline knowledge on the ecological role of fire in the *C. atlantica* forest. This information is vital to support ongoing ecosystem management efforts in the region.

Keywords: dendrochronology, fire scars, fire regime, Aurès Massif.

5.1. Introduction

In Mediterranean-type ecosystems, fire is a natural and regular process that plays a major role in shaping vegetation communities and landscapes, and controls plant species age structure and diversity (Trabaud, 1994). The present landscapes of most Mediterranean ecosystems are the result of a long evolution, during which plants evolved mechanisms to overcome the effects of fire and adapt to it (Trabaud, 1994; Ne'eman *et al.*, 2004).

Forest fires represent a serious environmental issue in the Mediterranean region and other regions that are characterized by Mediterranean climate such as California, central Chile, southern and southwestern Cape Province of South Africa, and southwestern parts of Australia (Montenegro *et al.*, 2004). According to Fernandes and Botelho (2004), wildfires burn an estimated average of 700,000-1,000,000 hectares of land every year in the Mediterranean Basin.

In Algeria, about 41,644 declared fires burned 1,162,484 hectares between 1979 and 2009 (Bekdouche, 2010). Algeria has a long history of forest fires. National fire statistics cover about 160 years, dating back to 1853 (Meddour-Sahar *et al.*, 2013). However, the data are more or less fragmentary. Meddour-Sahar *et al.* (2008, 2013) documented the fire history in Algeria over the French colonization and post-colonial periods. The authors noted that, despite the increase in concern for

environmental issues, fire frequency continued to increase over time, while the area burned tended to decrease slightly.

Long-term fire history data constitute a valuable tool in understanding present-day vegetation structure and composition for forest management and sustainability. Most of the studies on wildfires in Algeria were carried out in post-fire dynamics investigations (Lounis, 1998; Slimani, 2002; Bekdouche, 2010), and data on Atlas cedar forests are rare (Meddour, 1992).

Trees are excellent recorders of environmental changes and are well-suited to investigating past fire activity (Touchan *et al.*, 1995; Swetnam and Baisan, 1996; Fulé *et al.*, 2008). Varied techniques are used for reconstructing fire history. However, the most accurate records of actual fire events of the past are those from fire-scar data, which provides “point” fire frequencies with annual to seasonal resolution (Henderson, 2006).

In this first fire-history study in North Africa, we investigated the long-term fire regime of lower and upper elevations of the Atlas cedar forest of Mount Chélia, northern Algeria. We employed dendrochronological methods to determine exact fire dates. Fire history data, observations of site characteristics, and independent dendroclimatic reconstruction (Kherchouche *et al.*, 2012) were used to assess associations between fire regimes and environmental factors (Baisan and Swetnam, 1990; Touchan and Swetnam, 1995; Touchan *et al.*, 1996).

5.2. Material and methods

5.2.1. Study area

Our study area is located on Mount Chélia in the heart of the Aurès Massif, between the cities of Khenchela and Batna, northeastern Algeria (fig. 5.1). The area encompasses two adjacent sites, which are stands of Atlas cedar of about two hectares each: Oued Tider (OUT) and Thniet Zemroune (THZ) (fig. 5.2). The two sites differ in elevation by 110m. OUT, the lower stand, has north- to northwest-facing aspects, whereas THZ is positioned at the top of the hill, and has a south-facing aspect. The mean slope at both sites is about 25 % (table 5.1).

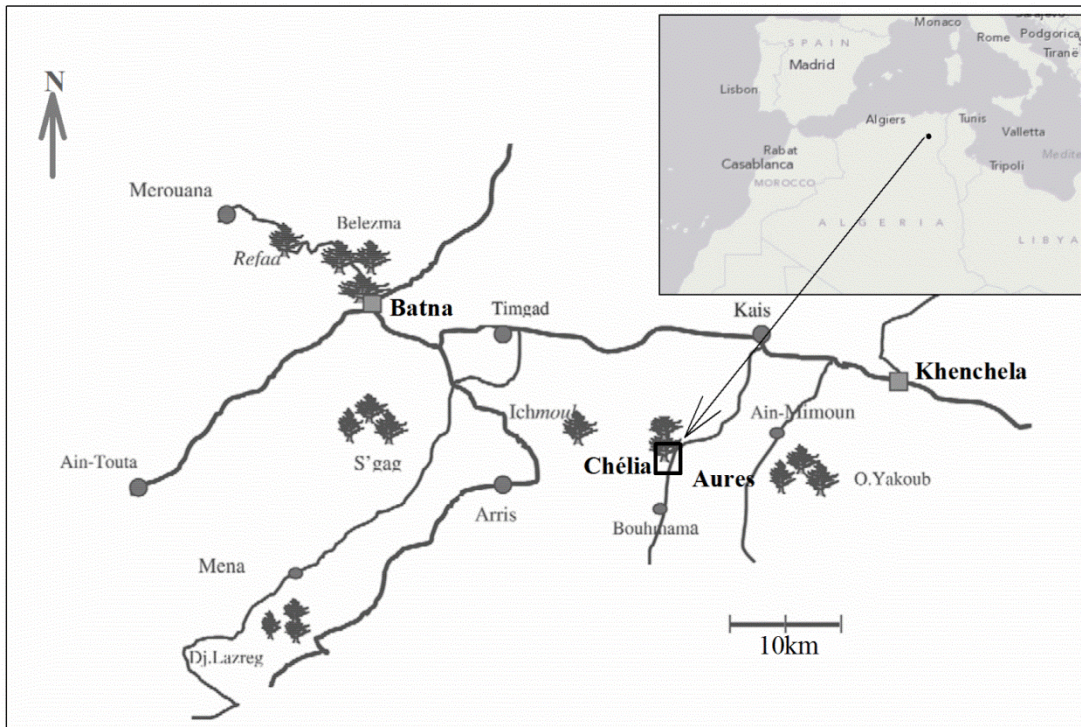


Figure 5.1. Location of the study area. Map redrawn from Bentouati (2008).

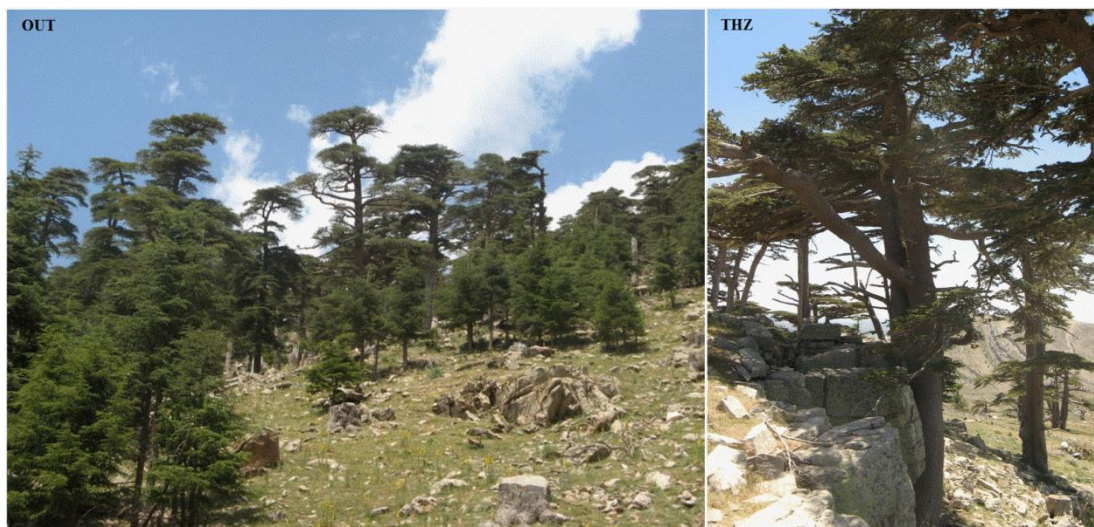


Figure 5.2. Study sites, OUT and THZ, in the Atlas cedar forest of Chélia.

The soil is well-drained and derived from sandstone and dolomite (Faurel et Laffite, 1949 *in* Belloula, 2011). The study area is characterized by a semi-arid Mediterranean climate with two contrasting seasons: wet and cold first season reaching a mean minimum temperature of -1°C in January; and a hot and dry second season extending from mid-May to late-September, with a mean maximum

temperature of 33 °C registered in August. The total annual precipitation is 388mm (Beghami, 2010). The snow-cover period, with 10-15 snowy days per year, lasts from January to March (Bensid, 1996 in Belloula, 2011); whereas the frost period, with an average frequency of 38 frost-days per year, is longer and lasts from November to April (Belloula, 2011).

The study area is an open forest consisting of almost pure stands of Atlas cedar with minor occurrence of *Quercus ilex* and *Juniperus oxycedrus* trees. The vertical structure of the vegetation is simple with a low understorey cover of herbs, shrubs and tree saplings that undergoes intense and continuous pressure from grazing. The main understorey plant species are *Berberis hispanica*, *Bupleurum spinosum*, *Aegilops triuncalis*, *Cytisus balansae*, *Teucrium chamaedrys* subsp. *chamaedrys*, *Ampelodesma mauritanica*, *Asphodelus ramosus*, *Calycotome spinosa*, *Genista pseudopilosa*, *Anthemis monilicostata*, *Thymus munbyanus*, *Sedum acre* subsp. *neglectum*.

Table 5.1. Site characteristics

Site	Code	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Slope (%)	Aspect	# samples
Oued Tider	OUT	35.31052°N	06.62447°E	1870	25	N-NW	14
Thniet Zemroune	THZ	35.30399°N	06.62974°E	1980	25	S	12

5.2.2. Fire-scar sampling and analyses

In September of 2012, we collected fire-scarred samples from stands at the lower and upper elevations, OUT and THZ respectively. The sampling procedure concentrated on the available dead material. Fourteen and twelve fire-scarred samples from OUT and THZ, respectively, were collected from stumps and logs using a chainsaw (table 5.1). One criterion for sample-tree selection was the presence of well-preserved scars showing evidence of fire by the number of healing ridges observed on the scarred surface (“cat face”) (Baisan and Swetnam, 1990). In the laboratory, the samples were glued onto plywood, fine-sanded and crossdated using dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1996). The FHX2 software program (Grissino-Mayer, 2001b) was used to compute descriptive

statistics. FHX2 is designed to analyze the fire history of forest ecosystems, and provides a means for entering, archiving, storing, editing, and manipulating fire history information from tree rings. FHX2 creates fire charts displaying fire chronologies for individual trees or for individual sites. It has powerful statistical functions for analyzing the temporal changes in fire regimes, seasonality of past fires, and spatial differences in fire occurrence between sites (Grissino-Mayer 1995).

To examine the temporal and spatial patterns of past fire occurrence, a composite fire chronology was computed for each site. Because of low synchronicity of fire events among recorder trees, the statistical analysis was performed taking into consideration all fire-scar dates from individual trees. Hence, the period of reliability was set at a minimum of only one fire-scarred sample (Grissino-Mayer, 1995). The main statistics included: (1) the Weibull Median Probability Interval (WMPI) and Mean Fire Interval (MFI), (2) standard deviation (SD) and (3) minimum and maximum fire intervals (Min. FI and Max. FI). The first statistical technique is a measure of central tendency, the second a measure of statistical dispersion, and the third a measure of range. According to Baker (1992), because the distribution of fire interval is often skewed, MFI might not be an adequate measure of central tendency. The Weibull distribution is more flexible in handling skewness because it is unnecessary to assume normality. Therefore, the WMPI is considered to be a more robust measure of central tendency (Grissino-Mayer, 2001b).

Trends in fire frequency were plotted using moving periods of 51 years lagged one year, and fire frequencies were plotted on the central year of the moving average. This is based on our analysis of long-term fire frequency over centuries.

5.2.3. Seasonality of past fires

Intra-ring positions of fire scars were identified to determine the approximate timing of individual fires relative to the growing season of the trees (Baisan and Swetnam, 1990; Touchan and Swetnam 1995). The events for which fire seasonality could not be determined were indicated as “unidentified” (U). Five

categories were used to classify the exact seasons (Baisan and Swetnam 1990; Grissino-Mayer, 1995; Touchan and Swetnam, 1995):

D = Dormant season (scars occur between the boundary of the latewood of the previous year and earlywood of the current year);

E = Early earlywood (scars appear in the first one-third of the earlywood);

M = Mid-earlywood (scars occur within the second third of the earlywood);

LE = Late earlywood (scars occur in the last third of the earlywood);

L = Latewood (scars occur within the latewood type cells but prior to the cessation of yearly growth).

5.2.4. Fire-climate analysis

Superposed Epoch Analysis (SEA) was used to compute the mean climate conditions before, during and after sets of fire years at both elevations (Baisan and Swetnam, 1990; Touchan *et al.*, 1996). In this analysis, fire years were “superposed” on the independent tree-ring reconstructed October-June precipitation (Kherchouche *et al.*, 2012) for the period 1473-2010. Mean precipitation values (expressed as departures from the long term mean) were computed for the set of fire years and lagged years and then plotted. Departures were computed as the difference between the long-term mean precipitation level (1473-2010) and the reconstructed mean precipitation during the fire years and lagged years. We conducted 1,000 Monte Carlo simulations of the same number of randomly selected dates to estimate confidence intervals for the mean departures of the fire dates at the 95 % and 99 % probability levels based on the normal approximation and percentile-rank methods (Mooney and Duval, 1993).

5.3. Results

5.3.1. Fire regimes

Most of the collected samples were successfully dated. Only one sample from OUT and three from THZ were not dated because a sample had too few rings or had no identifiable fire scars. The fire-scarred samples from the lower and upper stands contained an abundant and well-preserved fire history record (fig. 5.3).



Figure 5.3. Dated fire scars shown on an Atlas cedar cross-section, sample OUT 03.

Samples from OUT span 1507-1977 and record 57 fire scars, representing 48 separate fire events between 1523 and 1928. Samples from THZ span 1303-1991 and record 50 fire scars, representing 47 fire events between 1349 and 1893 (table 5.2).

Table 5.2. Information of fire-scar dates.

Site	# dated samples	Time span	Fires dated		# fire scars	Years with fire scars	Period of reliability (years)
			First	Last			
OUT	13	1507-1977	1523	1928	57	48	405
THZ	09	1303-1991	1349	1893	50	47	544

For OUT, only one sample was single-scarred (OUT07), and the maximum number of fire scars dated on a single sample was 7 (OUT13). As for THZ, the minimum number of fire scars dated on a single sample was 2 (THZ06) and the maximum was 15 (THZ08). However, most fire events were individual occurrences and were recorded on single samples. At OUT, five fire events (1552, 1585, 1620, 1682, and 1830) were identified on two different samples, and two events (1595 and 1627) were recorded on three samples. At THZ, only three fire events (1349, 1639, and 1677) were not individual and were recorded on two different samples (fig. 5.4).

OUT had shorter fire intervals than THZ (WMPI and MFI), and at both sites the composite WMPI was significantly shorter than the MFI (table 5.3 and appendixes 5.1 and 5.2). A higher variability was observed at THZ, where the SD was much higher than at OUT. Despite the comparable number of fire intervals at the two sites, fire frequency was greater at OUT. The minimum fire intervals had the same values for both areas, but the maximum fire intervals varied considerably and a higher value was registered for THZ.

Table 5.3. Summary of fire interval statistics for the two sites.

Site	Period	WMPI (years)	MFI (Years)	SD	Fire frequency	# FI	Max FI (years)	Min FI (Years)
OUT	1507-1977	6.29	8.62	9.47	0.12	47	59	1
THZ	1303-1991	9.36	11.83	10.93	0.08	46	67	1

An analysis of temporal patterns of fire regimes revealed high variability in fire interval and frequency over the periods of reliability. Fires declined in both areas after the mid-nineteenth century (figs. 5.4 and 5.5). The main fire frequency peak at OUT started late in the 16th century until the first quarter of the 17th century, and then declined gradually until dropping rapidly in the middle of the 19th century. At THZ, a first peak occurred around the mid-16th century, a second peak was observed in the second half of the 17th century, and a third period extended from the middle of the 18th century until the beginning of the 19th century. A sharp decline in fire frequency at THZ began in the middle of the 19th century.

The results show that in the common period 1507–1977, 48 and 36 fire scars were recorded at OUT and THZ respectively. But, in only four years (1556, 1621, 1710 and 1765) did fire scars occur at both sites. These common fire-scar years represent 5 % of the total recorded fire scars for this period.

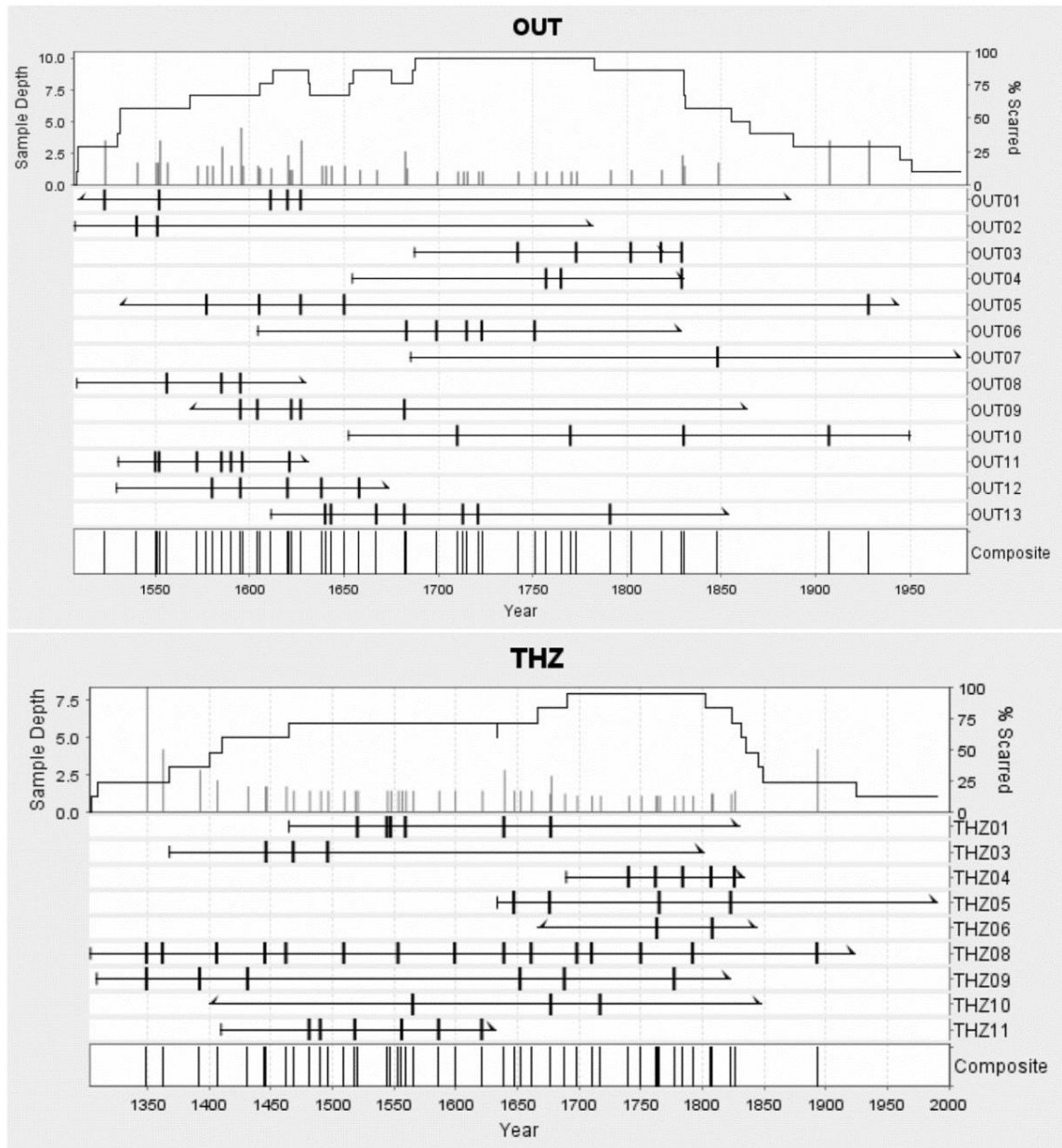


Figure 5.4. Composite fire history chart. Horizontal lines are maximum life span of trees. Vertical lines are composite fire dates recorded by the trees.

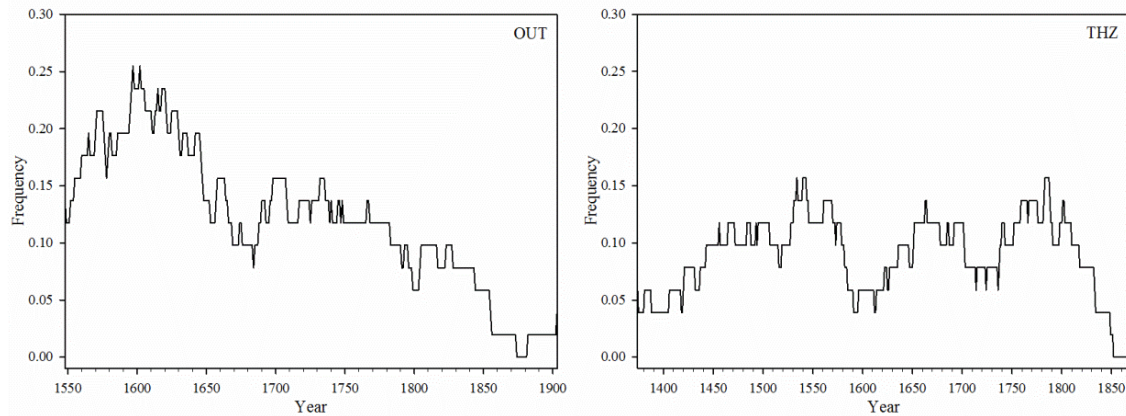


Figure 5.5. Fire frequency (number of fires/period) for OUT and THZ, using moving periods of 51-years. The frequencies are plotted on the central year of the moving period.

5.3.2. Fire seasonality

We determined the intra-ring position for 75 % and 20 % of the total fire scars at OUT and THZ respectively (fig. 5.6). The other scars were not classified because of decayed wood, narrowness of the rings in the scar area, or damage in the cambium or wood structure. The majority of fire scars were identified as latewood scars. At OUT, 76.7 % of scars were in the latewood, 18.6 % in the late earlywood, one in the middle of the growing season, and one in the dormant season. At THZ, 70 % of fires were formed in the latewood, only one scar occurred in the late earlywood, and two scars were formed in the earlywood.

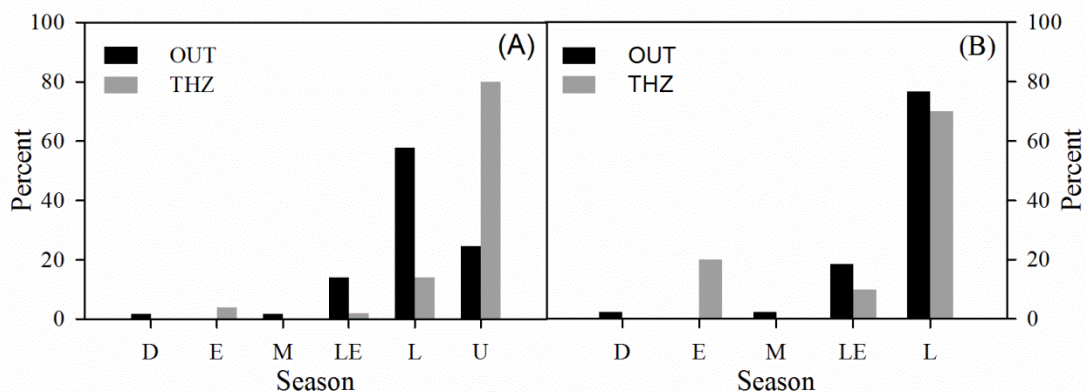


Figure 5.6. Seasonality of fires for the two studied sites (A) and percentage of each fire season based on samples where fire seasonality could be established (B).

At OUT, no temporal changes occurred in fire seasonality over several centuries, which have always been dominated by fires in the latter part of the growing season. In contrast, at THZ we could not determine if there was any change to the seasonality of fire scars over time because of the low percentage of classified fire-scars. The classified fire scars at THZ were distributed as follows: eight latewood scars (5, 2, and 1 in the 16th, 17th, 15th centuries respectively); one late earlywood scar in the 17th century; and three earlywood scars in the 15th, 16th, and 17th centuries.

5.3.3. Fire-climate relationships (Superposed epoch analysis)

The superposed epoch analysis did not show any significant relationships between the October-June precipitation reconstruction and fire events (fig. 5.7). See discussion for further details.

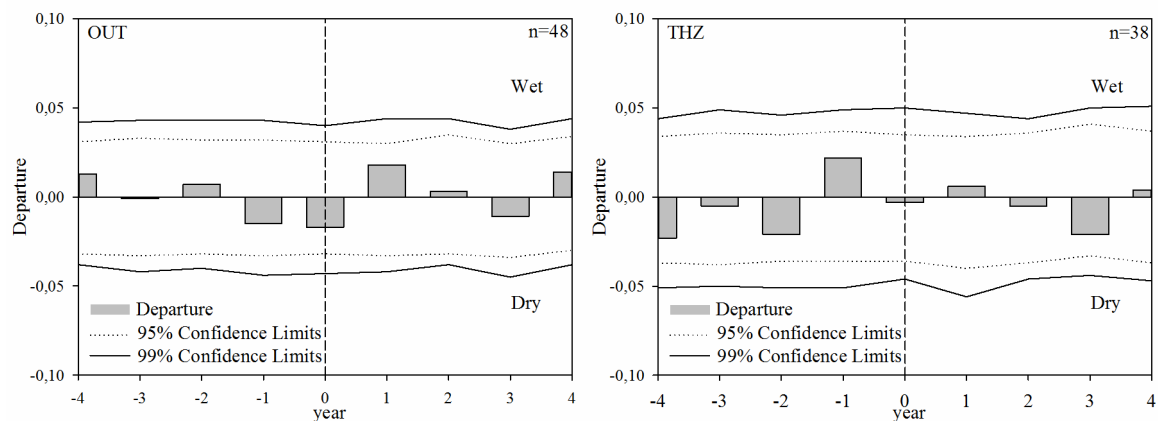


Figure 5.7. The superposed epoch analysis for OUT and THZ based on all fire dates for the period 1473-2010. The precipitation time series used was based on a tree-ring reconstruction of October-June precipitation (Kherchouche *et al.*, 2012). The "n" value is the number of fire years used in the calculations. Dark and dashed lines represent 99 % and 95 % confidence limit respectively.

5.4. Discussion

5.4.1. Fire regimes

The Atlas cedar cross-sections sampled have abundant fire scars. The high number of fire scars recorded on single samples reflects the potential of using Atlas cedar for fire history reconstruction. The records of past fires for long period of time are well-preserved in Atlas cedar because that tree species is fire resistant (M'herit, 1994) and long-lived (Lepoutre, 1964). Fire scars on our samples were found both in visible cat faces and as internal scars buried deep inside the wood. Most of the samples showed that the internal scars tend to heal over rapidly after a fire. However, most of fire events were recorded on single samples. The small number of scars that were recorded on more than one sample shows that past fires did not spread among different trees in the same stand. The documented fire history data for Mount Chélia from the Forests Conservation of Khenchela reports that fires were rare between 1985 and 2012 and that they occurred within limited areas in the Atlas cedar stands. This is directly related to the simple and open structure of this forest, in which the understorey cover is low, especially for pure stands. In addition, the common practice of overgrazing of livestock in the region (Bentouati, 2008; Belloula, 2011) removes grasses and herbs and disrupts fuel continuity, which are necessary for fire spread.

Various authors discuss the role of grazing in fire history patterns (Swetnam *et al.*, 1991; Grissino-Mayer *et al.*, 1995; Touchan *et al.*, 1995, 1996). Moreover, the short needles of the Atlas cedar form a compact litter characterized by a low flammability (Nageleisen, 2007), and the pure stands, especially when they are closed, are barely combustible and constitute an efficient barrier against fire propagation (Valette, 1990). Consequently, at both sites, most of the recorded fire events could be surface fires with low spatial extent. This possibility is reinforced by the fact that our samples show that the sampled trees survived the fire events. In a global analysis of fire history in Algeria from 1876 to 2007, Meddour-Sahar *et al.* (2008) reported that fire extent decreased with time by 16 %.

Atlas cedar trees are most susceptible to scarring by fire when they are young, presumably because then the bark is thinner and provides less protection. As an

illustration, more than 69 % of the sampled trees at OUT were less than 50 years old when they recorded their first fire scar. Because trees do not scar with every fire event, particularly in fires of low-to-moderate severity, these results are conservative estimates of fire occurrence (Swetnam *et al.* 1999). Few dendrochronological studies have reported similar site chronologies with more or less individual-tree fire patterns. In contuse, most have showed a relatively high inter-site synchronicity of fire (Henderson, 2006; Mundo *et al.*, 2013). In flammable to highly flammable forests, various studies have reported different patterns in which records of fire events were highly synchronous between trees and sites (Touchan *et al.*, 1995, 1996; Fulé *et al.*, 2008).

WMPI values were lower as a measure of central tendency of fire interval than MFI at both sites. WMPI should be the more reliable of the two statistics because it accounts for skewness in the data. The MFI and the WMPI were different at the two sites, and an analysis based on the common period (1507-1977) confirmed the lower MFI and WMPI associated with a higher fire frequency at OUT. This difference in fire interval between sites reflects the influence of the topography of local landscape on fire regimes, especially in mountain regions (De la Cueva, 2012). Fire activity was greater at the lower-elevation site than at the higher-elevation site (table 5.3). Various authors have made a similar observation that fire interval increases and fire frequency decreases as elevation increases (Gray *et al.*, 2002; Sherriff and Veblen, 2007). Our results were nevertheless surprising because OUT and THZ differ in elevation by only 110 m. OUT has north- to northwest-facing aspects, less rocky conditions, and the humidity is relatively higher than in THZ. This allows fine fuel accumulation (such as grasses), which promotes fire ignition and spread. THZ is drier because of its south-facing aspect, but its WMPI and MFI are higher because of site properties: unvegetated steep rocky cliffs that limit fine fuel accumulation, fire ignition and spread. Moreover, THZ is much less accessible than OUT, which reduces the risks of anthropogenic fires. Hence, fire occurrence might be more natural in THZ than in OUT. These topographic differences have likely played a key role in fire patterns at the two sites, which had very few synchronous fires.

A scan of figure 5.5 shows changes in occurrence of fire activity over time, and highlights a sharp decline in fire frequency after the mid-nineteenth century. While the sample depth is low for this period, especially at THZ, the available data from the Forest Conservation of Khenchela on registered fires on Mount Chélia confirm the paucity of fire occurrence between 1985 and 2012, and indicate that no fire has occurred at the two sites during this period. In addition, the local population and employees from the Forest Conservations of Batna and Khenchela made the same observation for previous decades. The decline in fire frequency coincided with the start of enforcement of the first land and forest use laws in Algeria. The decrees declared the forestlands to be state-owned, forbade the traditional practices of burning and charcoal production, and subjected violators to substantial fines (Bencheikh-El-Fegoun Abbassi, 2007). We assume that such new measures had considerable influence on fire ignition in the region.

5.4.2. Fire seasonality

Our results showed that fires occur in all seasons. However, climate pattern seems to have a major influence on the season during which fires occur, and some seasons are more conducive to fire than others. The scars for which fire seasonality could be established showed that at both sites most of the fires occurred in the summer, during the latter part of the growing season. Whelan (1995) *in* Oliveira and Fernandes (2009) reported that in Mediterranean-type ecosystems fires tend to occur from late spring to early autumn, at intervals of 5-50 years. Referring to Mediterranean Basin fire-climate dependence, Le Houérou (1974) associated the peak season of fire occurrence with the summer months, where drought conditions drop the live fuel moisture content down to 65 and 45 % of oven-dry weight. Naveh (1974) reported that typical Mediterranean “fire bioclimates” are characterized by long, hot, and dry summer seasons. In the western Mediterranean, dry and hot summers are combined with frequent heat waves of sirocco (Naveh, 1975). This phenomenon characterizes the climate of our study area where Atlas cedar grows at its southern distribution limit (Abdessemed, 1981).

Seasonality of fire is closely related to the ignitions caused by lightning or people (Henderson, 2006). In this study, some of the recorded fire events could be caused by lightning during the early to the late growing season. Such events were recorded and are visible on many living and dead trees at both sites. This partly explains why most fires were recorded on single samples. However, many other fire events could be assumed to be anthropogenic. Traditional periodic burning practices related to livestock pastures in sensitive areas or during high fire risk seasons with sirocco events were frequent in the region (Bencheikh-El-Fegoun Abbassi, 2007). Despite the enforcement of laws and decrees relating to land and forest use in Algeria since 1851 (Bencheikh-El-Fegoun Abbassi, 2007), no temporal changes in fire seasonality have occurred. Fires have always been more frequent in the summer, essentially influenced by the specific climate of the Mediterranean region, which is characterized by dry and hot summers and severe local wind events (Bekdouche, 2010; Turco *et al.*, 2013).

5.4.3. Fire-climate relationships

Despite the influence of climate on fire regimes in the Mediterranean region (Le Houérou, 1974; Naveh, 1974; Turco *et al.*, 2013), no significant relationships were found between October-June precipitation and fire events (fig. 5.7). This confirms the importance of other factors such as lightning and anthropogenic ignitions in the study area. Many studies showed that the Mediterranean basin is marked by a prevalence of human-induced fires (Drouet, 1973; Ne'eman *et al.*, 2004). As an illustration, although the cause of the majority of fire events is declared unidentified, Dimitrakopoulos (1995) reported that at least one in two fires in Greece were intentionally lit. Meddour-Sahar *et al.* (2013) noted that forest fires in Algeria are mostly human-caused and result from local social behavior, whether voluntary or involuntary (negligence or arson).

In a Mediterranean ecosystems, such as California in the United States, studies have highlighted the importance of wet/dry patterns in fire occurrence and showed that wet conditions in prior years are necessary for fire outbreak (Beaty and Taylor,

2008; Taylor *et al.*, 2008; Swetnam *et al.*, 2009). Our results, however, were inclusive on this aspect of fire occurrence.

5.5. Conclusions

This is the first fire history study using Atlas cedar tree rings in North Africa, specifically in Algeria. Atlas cedar trees are a natural archives of past fire events. Fire scars are particularly abundant and well-preserved in the wood. Past fires on Mount Chélia were frequent with a pattern of occurrence on single sample. With the promotion of the first land and forest use laws in Algeria from the second half of the nineteenth century, fire frequency declined dramatically. Anthropogenic factors have played a major role in fire occurrence in the study area. As in other Algerian rural regions, traditional burnings for pastoral purposes and charcoal production were frequent before the entry into effect of these laws and decrees. In addition, permanent and intense grazing reduced fine fuels necessary for the spread of fire and its occurrence at high-severity. Hence, we assume that the mentioned frequent events were surface fires with low to moderate severity and extended over limited areas. From a historical perspective, the short-term climate conditions did not have a particularly significant effect on fire occurrence in the study area. Most of fires would have been anthropogenic or caused by lightning.

Our study represents two case studies of fire regimes in Mount Chélia. It demonstrates that the past fire regimes in Mount Chélia were the result of complex interactions between combinations of anthropogenic and natural factors. These data provide an understanding of patterns and processes that are useful for explaining ecosystem structure and dynamics that we observe today. It is our hope that insights deriving from our studies of these historical patterns and processes will lead to the knowledge necessary for "retrodicting" and predicting past and future fire regimes, respectively, for use in ecosystem management planning. Such information will offer a quantitative measure of the frequency of past fire regimes. Local dendrochronological studies are a first step toward building regional networks to address issues regarding the understanding and management of fire regimes in the region and possible linkages to regional climate and climatic change.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était d'utiliser les anneaux annuels de croissance du cèdre de l'Atlas pour reconstituer la variabilité climatique passée et tester le potentiel de cette espèce pour la reconstitution de l'historique des incendies au niveau de deux régions du nord algérien, caractérisées par un climat méditerranéen à variantes différentes. En outre, cette étude analyse la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique à long terme. Associant, ainsi, la dendroclimatologie à la dendroécologie, ce travail, dont les principaux résultats sont récapitulés dans cette section, apporte des éléments originaux à la dendrochronologie nord-africaine et méditerranéenne.

Le volet dendroclimatologique repose sur huit sites équitablement répartis entre les régions des Aurès et de Kabylie. Nos résultats mettent en évidence la sensibilité des arbres sondés à la variation des conditions climatiques au niveau des deux régions d'étude. Ceci a rendu la datation des échantillons ainsi que leur interdatation plus ou moins faciles, malgré le nombre important de cernes manquants caractérisant nos chronologies, notamment celles de la région des Aurès.

Grâce au caractère longévif de l'espèce, les chronologies établies sont assez longues et montrent un important potentiel pour les analyses dendrochronologiques à long terme. Dans cette étude nous avons utilisé les chronologies résiduelles au seuil d'EPS de 0,85. Nos reconstructions pour les deux régions d'étude ont été basées sur la période commune aux sites impliqués dans l'analyse, ce qui a réduit considérablement les périodes de reconstruction, reposant sur la série la plus courte établie pour chaque région. L'analyse du signal climatique a mis en évidence le grand potentiel des arbres sondés pour la reconstruction des précipitations cumulées d'octobre de l'année t-1 à juin de l'année t. Le signal climatique détecté dans les chronologies résiduelles est plus fort pour la région des Aurès, caractérisée par des conditions climatiques plus contraignantes à la croissance. Les corrélations entre les précipitations d'octobre à juin et les séries d'indices de croissances sont très hautement significatives : les précipitations, considérées dans leurs périodes de

calibration totales, expliquent 40 et 56 % de la variabilité de la croissance des arbres dans les régions de Kabylie et des Aurès respectivement.

Les précipitations reconstruites couvrent les périodes 1761-2009 dans les Aurès et 1898-2011 au niveau de la région de Kabylie. Elles sont caractérisées par de fortes variabilités interannuelles à décennales. Cependant, les plus forts pics sont observés à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle. C'est au cours de cette période que la similitude des tendances d'évolution des précipitations reconstruites de nos deux régions d'étude est la plus prononcée, avec la coïncidence des années humides et sèches communes aux deux reconstructions. Les épisodes de sécheresse les plus sévères ont caractérisé les dernières décennies de nos reconstructions, avec un pic sans précédent enregistré au début du xxi^e siècle. Ceci dénote la tendance à une haute variabilité climatique avec des conditions de plus en plus sèches dans nos régions d'étude.

La croissance radiale a montré une tendance d'évolution similaire à celle décrite pour les précipitations reconstruites : les chronologies établies sont caractérisées par une forte variabilité de la croissance sur l'ensemble des périodes d'étude, avec une augmentation nette des fréquences relatives des chronologies en cernes diagnostiques, notamment des cernes minces, à partir de la deuxième moitié du xx^e siècle. Ceci confirme les conditions de plus en plus contraignantes à la croissance du cèdre de l'Atlas régnautes dans les aires échantillonnées.

Les patrons de croissance des sites étudiés ont montré une très bonne synchronisation. Le synchronisme est d'autant plus élevé que les conditions climatiques sont plus contraignantes : la corrélation entre les sites a été faible lors des périodes humides, ayant abouti à l'élaboration de cernes de croissance plus ou moins larges. Au contraire, c'est au cours des périodes sèches, caractérisées par une croissance faible, exprimée par la production d'un cerne mince, que les corrélations entre les chronologies ont été les plus fortes.

La variabilité commune de la croissance et la sensibilité moyenne sont principalement influencées par la variabilité des précipitations : ces deux paramètres affichent des corrélations positives et très hautement significatives avec le

coefficient de variation des précipitations reconstruites, prises sur des intervalles de 20 années décalées d'une année, tandis qu'aucune relation significative n'a été observée en considérant le cumul moyen des précipitations. Les principaux pics de la variabilité commune de la croissance et de la sensibilité moyenne coïncident aussi avec des périodes de sécheresse extrême, dont trois événements ont occasionnés des épisodes de dépérissement forestier dans nos régions d'étude : le premier a été observé entre la fin des années 1870 et le début des années 1880, le deuxième vers la fin des années 1970 et le dernier entre la fin du xx^e siècle et le début du xxi^e siècle.

L'analyse de la réponse du cèdre de l'Atlas à la variabilité climatique au sein de chacune de nos aires d'étude montre que l'impact des conditions limitantes a été plus considérable au niveau de la limite méridionale de l'aire de distribution naturelle de l'espèce en Algérie. Néanmoins, une analyse globale, basée sur l'ensemble des huit sites échantillonnés, montre que nos aires d'étude ont évolué vers des conditions climatiques de plus en plus semblables au cours du dernier siècle, notamment à partir de sa deuxième moitié. Au cours de cette période, les arbres sont devenus de plus en plus sensibles et vulnérables et leur réponse commune aux conditions macroclimatiques n'a cessé d'augmenter. En même temps, les effets liés aux conditions locales de site et de peuplement, marquant la spécificité de chaque site et région d'étude, ont montré une nette régression. Ceci pourrait mener, à long terme, au bouleversement, voire à la disparition par endroits, des conditions écologiques locales permettant la subsistance dans son milieu naturel de l'espèce étudiée.

Le volet dendroécologique a été mené sur deux sites adjacents situés dans le mont Chélia (massif de l'Aurès), Oued Tider et Thniet Zemroune. Il s'agit du premier travail publié traitant de la dendropyrochronologie en Afrique.

Les sections transversales collectées au niveau des deux sites se caractérisent par l'abondance des cicatrices de feu. La quasi-totalité des échantillons a été datée et la saison pendant laquelle le feu a eu lieu a été déterminée pour 20 et 75 % des cicatrices à Thniet Zemroune et Oued Tider respectivement. Toutes les cicatrices de

feu ont été bien conservées dans le bois du cèdre de l'Atlas pour des périodes dépassant dans certains cas les six siècles. Ceci justifie le potentiel de l'espèce pour la reconstitution de l'historique des incendies.

Les feux datés montrent une tendance individuelle marquée par un très faible synchronisme entre les arbres et les sites d'étude. Jusqu'à la première moitié du XIX^e siècle le régime des incendies au mont Chélia a été caractérisé par des feux fréquents. Le pâturage intensif pratiqué dans la région a constamment réduit le recouvrement du sous-bois et très limité le développement de la strate herbacée, conduisant ainsi à un parterre forestier avec un combustible trop peu fourni pour pouvoir générer des événements de feux intenses. De ce fait, nous admettons que les événements enregistrés étaient des feux de surface d'une intensité faible à modérée, avec une extension très limitée. Comme partout ailleurs dans la région méditerranéenne, la plupart des incendies ont eu lieu pendant la saison estivale vers la fin de la saison de croissance.

Le déclin de l'activité des feux de forêt dans les peuplements étudiés coïncide avec le début de la période coloniale française et la promulgation des premières lois relatives à l'utilisation des sols et des forêts en Algérie : comme toute autre ressource naturelle, les forêts ont été déclarées propriétés de l'État, où toute activité de la population indigène a été interdite. Par ailleurs, l'analyse des époques superposées montre que les conditions climatiques à court terme n'ont eu aucun effet significatif sur le départ des incendies au niveau des deux sites d'étude. Ceci dénote le rôle majeur des facteurs anthropogéniques dans le régime des incendies au niveau la zone d'étude. Cependant, de nombreux feux datés seraient générés par la foudre. En effet, lors de nos sorties de terrain, nous avons observé de nombreuses cicatrices laissées par la foudre sur les troncs d'un bon nombre d'arbres vivants.

Enfin, malgré la proximité des sites d'études, l'effet combiné de l'altitude et de l'exposition nous permet d'avancer que nos résultats présentent deux études de cas de régimes des incendies au niveau du mont Chélia.

Les résultats présentés dans cette étude montrent que les cernes de croissance du cèdre de l'Atlas constituent une très bonne archive naturelle, conservant des

paramètres mesurables très intéressants pour les reconstructions climatiques et celles des feux passés. Néanmoins, beaucoup reste à faire dans ce domaine en Algérie et de nombreuses questions restent posées. À cet effet, notre étude ouvre des perspectives multiples de recherches futures.

D'une part, il est important de renforcer les chronologies établies. Sur le plan dendroclimatique, il est nécessaire d'adopter une méthode d'échantillonnage impliquant à la fois le sondage à la tarière de Pressler et la collecte de sections transversales sur du bois mort âgé. Cela permettra, entre autres, de rallonger les séries chronologiques de plusieurs siècles. Pour ce qui est de la reconstitution de l'histoire des incendies, des échantillons supplémentaires pris sur des arbres vivants permettra de couvrir les dernières décennies et donnera l'opportunité de comparer les dates des cicatrices de feu identifiées aux dates d'incendies enregistrées par les services forestiers sur la même période. Par ailleurs, nos chronologies montrent la possibilité d'une reconstitution climatique pour l'aire couverte par l'ensemble des deux régions d'étude. Malheureusement, elle n'a pu être réalisée faute d'un réseau de données de précipitations fiables permettant l'établissement d'un modèle de reconstruction robuste. Pour pallier ce problème majeur souvent posé en dendroclimatologie, il est indispensable de constituer des réseaux de recherche pluridisciplinaires afin de disposer de données climatiques nécessaires à différentes échelles spatiales.

D'autre part, il est souhaitable d'élargir l'aire d'étude à d'autres régions du pays, en impliquant d'autres essences forestières à intérêt dendrochronologique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdessemed K. 1981. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Étude phytosociologique. Problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Doc. Ing. Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille. 201 pp.
- Abdessemed K. 1984. Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). Première partie : La dégradation, ses origines et ses conséquences. Forêt méditerranéenne 6 (1), 19-26.
- Abdessemed K. 1985. Les problèmes de la dégradation des formations végétales dans l'Aurès (Algérie). Deuxième partie : Les mesures à prendre. Forêt méditerranéenne 7 (1), 43-52.
- Alileche A. 2012. Étude du dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans la cédraie des Aurès : Belezma (Batna) et Chélia (Khenchela). Mémoire de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger. 106 pp.
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, *et al.* 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259, 660-684.
- Andrea C, Roberto M. 1994. Growth performances of a thinned Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Man.) stand. *Ann. Rech. For. Maroc* 27, 281-293.
- Andreu L, Gutiérrez E, Macias M, Ribas M, Bosch O, Camarero JJ. 2007. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology* 13, 1-12, doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01322.x.
- Baisan CH, Swetnam TW. 1990. Fire history on a desert Mountain range: Rincon Mountain Wilderness, Arizona, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 20, 1559-1569.
- Baker WL. 1992. The landscape ecology of large disturbances in the design and management of nature reserves. *Landscape Ecology* 7, 181-194.
- Beaty RM, Taylor AH. 2008. Fire history and the structure and dynamics of a mixed conifer forest landscape in the northern Sierra Nevada, Lake Tahoe Basin, California, USA. *Forest Ecology and Management* 255, 707-719.

- Beghami R. 2010. Contribution à l'étude des insectes associés au dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans la région des Aurès : cas de la cédraie de Chélia. Mémoire de Magister. Université Hadj Lakhdar, Batna. 132 pp.
- Beghami Y. 2013. Écologie et dynamique de la végétation de l'Aurès : analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde. Thèse de Doctorat. Université Mohamed Khider, Biskra. 193 pp.
- Bekdouche F. 2010. Évolution après feu de l'écosystème subéraie de Kabylie (nord de l'Algérie). Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou. 147 pp.
- Belloula N. 2011. Étude expérimentale de l'influence de la typologie des Cédraies sur la distribution des formes d'Azote dans certains sols du massif forestier du Chélia (W. de Khenchela). Mémoire de Magister. Université El-Hadj Lakhdar, Batna. 136 pp.
- Benabid A. 1985. Les écosystèmes forestiers préforestiers et presteppiques du Maroc. Diversité, répartition biogéographique et problèmes posés par leur aménagement. Forêt Méditerranéenne 7 (1), 53-64.
- Benabid A. 1994. Biogéographie phytosociologie et phytodynamique des cédraies de l'Atlas *Cedrus atlantica* (Manetti). Ann. Rech. For. Maroc 27, 61-76.
- Bencheikh-El-Fegoun Abbassi F. 2007. L'impact des lois foncières coloniales sur la situation socio-économique des paysans Algériens, de 1873 à 1911. Application à trois communes de l'ancien arrondissement de Constantine (El Khroub-Oum el Bouaghi-El Milia). Thèse de Doctorat . Université Mentouri, Constantine. 228 pp.
- Benhalima S. 2006. Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) dans le Haut et le Moyen-Atlas (Maroc). Université Mohammed V-Agdal, Institut Scientifique, Rabat. Série Zoologie 46. 63 pp.
- Benmouffok A. 1994. Approche écopédologique dans les formations à *Cedrus atlantica* : cas du massif du Djurdjura, Algérie. Ann. Rech. For. Maroc 27, 205-217.
- Bentouati A. 2008. La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). Forêt Méditerranéenne 29 (2), 203-208.
- Berger A, Guiot J, Mathieu L, Munaut A. 1979. Cedar tree-rings and climate in Morocco. Tree-Ring Bull 39, 61-75.
- Bergeron Y, Denneler B, Charron D, Girardin MP. 2002. Using dendrochronology to reconstruct disturbance and forest dynamics around Lake Duparquet, northwestern Quebec. Dendrochronologia 20 (1-2), 175-189.

- Biondi F, Qeadan F. 2008. Inequality in paleorecords. *Ecology* 89(4), 1056-1067.
- Biondi F, Waikul K. 2004. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30, 303-311.
- Bonin G. 1994. Quelques aspects des forêts d'Afrique du Nord. *Forêt méditerranéenne* 15 (1), 69-74.
- Boudy P. 1952. Guide du forestier en Afrique du Nord. Éd. La Maison Rustique. 505 pp.
- Brubaker LB. 1978. Effects of defoliation by Douglas-fir tussock moth on ring sequences of Douglas-fir and grand fir. *Tree-Ring Bulletin* 38, 49-60.
- Brustel H, Goux N, Bouyon H, Rogé J. 2013. Les *Stephanopachys* de la faune ouest-paléarctique (Coleoptera Bostrichidae) : distribution et reconnaissance des trois espèces françaises au service de l'application de la directive Habitats, Faune, Flore. *L'Entomologiste* 69 (1), 41-52.
- Camus, A. 1947. La peste. Les éditions Gallimard, 347^e édition, Paris. 332 pp.
- Camus, A. 1948. L'état de siège. Les éditions Gallimard, Paris. 235 pp.
- Chapin FS III, Rincon E, Huante P. 1993. Environmental responses of plants and ecosystems as predictors of the impact of global change. *J. Biosci.* 18 (4), 515-524.
- Chbouki N, 1992. Spatio-temporal characteristics of drought as inferred from tree-ring data in Morocco. Thèse de Doctorat. The University of Arizona, Tucson, Tucson. 243 pp.
- Chbouki N, Stockton CW, Myers D. 1995. Spatio-temporal patterns of drought in Morocco. *Int. J. Climatol.* 15, 187-205.
- Cheddadi R, Fady B, François L, Hajar L, Suc GP, Huang K, *et al.* 2009. Putative glacial refugia of *Cedrus atlantica* deduced from Quaternary pollen records and modern genetic diversity. *Journal of Biogeography* 36, 1361-1371, doi: 10.1111/j.1365-2699.2008.02063.x.
- Chmura DJ, Anderson PD, Howe GT, Harrington CA, Halofsky JE, Peterson DL, *et al.* 2011. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. *Forest Ecology and Management* 261, 1121-1142.
- Cook ER. 1985. A Time-Series Approach to Tree-Ring Standardization. Thèse de Doctorat. The University of Arizona, Tucson. 171 pp.
- Cook ER, Briffa KR. 1990. A comparison of some tree-ring standardization methods, *in*: *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, edited by Cook ER, Kairiukstis LA. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. pp. 153-162.

- Cook ER, Holmes RL. 1999. Program ARSTAN User's Manual. Tucson, AZ: Laboratory of Tree-Ring Research. The University of Arizona, Tucson. 81 pp.
- Csaba M. 1994. Results of introduction trials with *Cedrus atlantica* in Hungary. Ann. Rech. For. Maroc 27, 219-222.
- Dahman M, Khouja ML. 1994. Résultats des essais d'acclimatation du cèdre en Tunisie. Ann. Rech. For. Maroc 27, 129-138.
- De la Cueva AV. 2012. Relative contributions of forest vegetation, land cover, topography and climate in explaining fire regime patterns (1974–2005) in Peninsular Spain. ISRN Forestry. 11 pp., doi: 10.5402/2012/479491.
- Delkov A, Grozez O. 1991. Résultats de l'introduction du *Cedrus atlantica* Manetti en Bulgarie de sud-ouest. Ann. Rech. For. Maroc 27, 173-185.
- Delwaide A, Filion L. 2010. Échantillonnage et datation dendrochronologique, in : S. Payette et L. Filion. La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. pp. 167-197.
- Demarteau M, Francois L, Cheddadi R, Roche E. 2007. Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. Geo-Eco-Trop. 31, 105-146.
- Demolin G, Frérot B, Chambon JP, Martin JC. 1994. Réflexions biosystématiques sur toutes les processionnaires du genre *Thaumetopoea* Lep. *Thaumetopoeidae*, considérées comme ravageurs importants des cèdres *Cedrus libani* Barel et *Cedrus atlantica* Manetti sur le pourtour du Bassin méditerranéen. Ann. Rech. For. Maroc 27, 577-591.
- Derridj A. 1990. Étude des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse. 288 pp.
- Dimitrakopoulos A. 1995. Analyse des causes des feux de forêt en Grèce, in : Chevrou R. (ed.), Delabrazé P. (ed.), Malagnoux M. (ed.), Velez R. (ed.). Les incendies de forêt en région méditerranéenne : constitution et utilisation des bases de données. Options Méditerranéennes, Série A. Séminaires Méditerranéens 25, 33-40.
- Dorado Liñán I, Gutiérrez E, Andreu-Hayles L, Heinrich I, Helle G. 2012. Potential to explain climate from tree rings in the south of the Iberian Peninsula. Clim. Res. 55, 121-136, doi: 10.3354/cr01126.
- Douglass AE. 1939. Typical site of trees producing the best crossdating. Tree Ring Research 6 (2), 10-11.
- Douglass AE. 1945. Precision of ring dating in tree-ring chronologies. Tree-Ring Research Bulletin 3, 1-21.

- Drouet JC. 1973. Les feux de forêts, en région méditerranéenne. Théorie de propagation et moyens de lutte efficaces, *in* : Méditerranée, deuxième série 12 (1), 29-53.
- Dukerley EI. 1868. Notice sur les mesures de préservation prises à Batna (Algérie) pendant le choléra de 1867 et sur leurs résultats. Adrien Delahaye Libraire-Editeur, Paris. 70 pp.
- El Abidine AZ. 2003. Forest decline in Morocco: causes and control strategy. *Science et changements planétaires. Sécheresse* 14, 209-218.
- El Yousfi M. 1994. La santé du cèdre de l'Atlas au Maroc. *Ann. Rech. For. Maroc* 27, 593-611.
- El Yousfi M. 1989. La procesionaria del cedro, *Thaumetopoea bonjeani* (Powell). *Bol. San. Veg. Plagas* 15, 43-56.
- Emberger L. 1938. Contribution à la connaissance des Cèdres et en particulier du Deodar et du Cèdre de l'Atlas, *in* : *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*. 18^e année, bulletin n° 198, 77-92, doi : 10.3406/jatba.1938.5828.
- Esper J, Frank D, Büntgen U, Verstege A, Luterbacher J, Xoplaki E. 2007. Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophysical Research Letters* 34, L17702, doi: 10.1029/2007GL030844.
- Fabre JP. 1976. Extension du cèdre et risques d'attaques d'insectes. *R.F.F.* 27 (4), 261-269.
- Fabre JP. 1994. État actuel des connaissances sur les ravageurs originaires de l'aire naturelle des cèdres parvenus en France, colonisation par les insectes d'un nouvel écosystème forestier. *Ann. Rech. For. Maroc* 27, 539-551.
- Fabre JP, Mouna M, Du Merle P, Benhalima S. 1999. Le point sur certains ravageurs du cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord, en France et en Europe. *Forêt méditerranéenne* 10 (4), 203-218.
- Fernandes P, Botelho H. 2004. Analysis of the prescribed burning practice in the pine forest of northwestern Portugal. *Journal of Environmental Management* 70, 15-26.
- Fernández-Fernández MI, Gallego MC, Domínguez-Castro F, Vaquero JM, Moreno-González JM, Castillo-Durán J. 2011. Reconstruction of rainfall in Zafra (southwest Spain) from 1750 to 1840 from documentary sources, *Clim. Past Discuss.* 7, 3895-3918, doi: 10.5194/cpd-7-3895-2011.
- Foster TE, Brooks JR. 2001. Long-term trends in growth of *Pinus palustris* and *Pinus elliottii* along a hydrological gradient in central Florida. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 1661-1670.

- Fritts HC. 1976. Tree rings and climate. London, New York, San Francisco, Academic Press. 567 pp.
- Fritts HC, Guiot J, Gordon G. 1990. Verification, *in*: Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences, edited by Cook ER, Kairiukstis LA. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. pp. 178-184.
- Fulé PZ, Ribas M, Gutiérrez E, Vallejo V. 2008. Forest structure and fire history in an old *Pinus nigra* forest, eastern Spain. *Forest Ecology and Management* 255, 1234-1242.
- Gachi M. 1994. Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre : *Thaumetopoea bonjeani* Powell (*Lepidoptera; Thaumetopoeidae*). *Ann. Rech. For. Maroc* 27, 527-537.
- Ghanem 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*. 5, 143-165.
- GIEC. 2007. Changements climatiques 2007. Rapport de synthèse. 103 pp. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf [21/09/ 2014].
- Giorgi F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, L08707, doi: 10.1029/2006GL025734.
- Gouaref K. 2012. Contribution à l'étude cartographique et écologique du dépérissement du Cèdre de l'Atlas dans le massif de Guetiane (W-Batna). Mémoire de Magister. Université El-Hadj Lakhdar, Batna. 126 pp.
- Gray RW, Andrew B, Blackwell BA, Needoba A, Steele F. 2002. The effect of physiography and topography on fire regimes and forest communities. A draft report submitted to Habitat Conservation Trust Fund for the British Columbia Ministry of Forests. British Columbia Ministry of Forests, Victoria B.C. 80 pp.
- Griggs C, Pearson C, Manning SW, Lorentzen B. 2013. A 250-year annual precipitation reconstruction and drought assessment for Cyprus from *Pinus brutia* Ten. tree-rings. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.3869.
- Grissino-Mayer HD. 1995. Tree-ring reconstructions of climate and fire history at El Malpais National Monument, New Mexico. Thèse de Doctorat. The University of Arizona, Tucson. 407 pp.
- Grissino-Mayer HD. 2001a. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program Cofecha. *Tree-ring bulletin* 57 (2), 205-221.
- Grissino-Mayer HD. 2001b. FHX2. Software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research* 57(1), 115-124.

- Grissino-Mayer HD, Baisan CH, Swetnam TW. 1995. Fire history in the Pinaleno Mountains of southern Arizona: Effects of human-related disturbances, *in*: De Bano, LF, Ffolliott PF, Gottfried GJ, Hamre RH, Edminster CB, Ortega-Rubio A, eds., Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago: The Sky Islands of southwestern United States and northwestern Mexico. Ft. Collins, CO: USDA Forest Service, General Technical Report RM-GTR-264, pp. 399-407.
- Guibal F, Tessier L. 1998. L'apport de l'analyse dendrochronologique et dendroclimatologique à la connaissance du climat de la vallée du Rhône du I^{er} s. avant J.-C. au II^e s. après J.-C. *In* : Méditerranée, Tome 90, 4-1998. Archéologie et paléopaysages. pp. 5-10.
- Guiot J. 1991. The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bull.* 51, 39-41.
- Guiot J, Berger AL, Munault AV, Till CL. 1982. Some new mathematical procedures in dendroclimatology, with examples from Switzerland and Morocco. *Tree-Ring Bullerin* 42, 33-48.
- Guiot J, Nicault A. 2010. Méthode de dendrochronologie à l'échelle continentale : fonctions de réponse et fonctions de transfert, *in* : S. Payette et L. Filion. La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. pp. 229-253.
- Gutiérrez E. 1988. Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Acta Œcologica / Œcologica Plantarum* 9 (3), 301-309.
- Gutiérrez E. 1991. Climate tree-growth relationships for *Pinus uncinata* Ram. in the Spanish pre-Pyrenees. *Acta Œcologica* 12 (2), 213-225.
- Hadibi A, Chekired-Bouras FZ, Mouhouche B. 2009. Économies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 26-28 mai 2008. 9 pp.
- Henderson JP. 2006. Dendroclimatological Analysis and Fire History of Longleaf Pine (*Pinus palustris* mill.) in the Atlantic and Gulf Coastal Plain. Thèse de Doctorat. The University of Tennessee, Knoxville. 463 pp.
- Holmes RL. 1983. A 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* 2 (1), 97-103.

- Kherchouche D, Kalla M, Gutiérrez EM, Attalah S, Bouzghaia M. 2012. Impact of droughts on *Cedrus atlantica* forests dieback in the Aurès (Algeria). *J. Life Sci.* 6, 1262-1269.
- Kherchouche D, Kalla M, Gutierrez E, Briki A, Hamchi A. 2013. La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Sécheresse* 24 (2), 129-37.
- Kitouni H. 2013. La Kabylie orientale dans l'histoire. Pays des Kutuma et guerre coloniale. Éditions L'Harmattan. 193 pp.
- Köse N, Akkemik Ü, Güner HT, Dalfes N, Grissino-Mayer HD, Özeren MS, Kindap T. 2013. An improved reconstruction of May-June precipitation using tree-ring data from western Turkey and its links to volcanic eruptions. *Int. J. Biometeorol* 57, 691-701, doi: 10.1007/s00484-012-0595-x.
- Krouchi F. 2010. Étude de la diversité de l'organisation reproductive de la structure génétique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en peuplement naturel (Tala Guilef, Djurdjura, nord-ouest, Algérie). Thèse de Doctorat d'Etat. Université Mouloud Memmeri, Tizi Ouzou. 127 pp.
- Lanier L. 1994. Les champignons des cédraies en Algérie (étude comparative). *Ann. Rech. For. Maroc* 27, 553-563.
- Lapie G. 1909. Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurdjura. Thèse de Doctorat. Université de Paris. 156 pp.
- Lebourgeois F, Mérian P. 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. AgroParisTech-ENGREF. 88 pp.
- Le Houérou HN. 1974. Fire and vegetation in the Mediterranean Basin. *Proceedings of the Annual Tall Timbers Fire Ecology Conference* 13, 237-277.
- Le Houérou HN. 1980. L'impact de l'homme et de ses animaux sur la forêt méditerranéenne, 1^{ère} partie. *Forêt méditerranéenne* 2 (1), 31-44.
- Le Houérou HN, Claudin J, Pouget M. 1977. Étude bioclimatique des steppes algériennes. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord* 68 (3-4), 33-74.
- Lenton TM, Held H, Kriegler E, Hall J, Lucht W, Rahmstorf S, Schellnhuber H J. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 1786-1793, doi:10.1073/pnas.0705414105.
- 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.

- Linares JC, Taïqui L, Camarero JL. 2011. Increasing drought sensitivity and decline of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests, *Forests* 2 (3), 777-796, doi: 10.3390/f2030777.
- Loucif Seiad N. 2003. Les ressources en eau et leurs utilisations dans le secteur agricole en Algérie. *Revue H.T.E.* 125, 94-101.
- Lounis N. 1998. Impact de l'incendie sur la végétation et sur les caractéristiques de la couche superficielle du sol au niveau des formations à *Quercus suber* L. (cas de la forêt de Mizrana - Tizi Ouzou). Thèse de Magister. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou. 85 pp.
- Macias M, Andreu L, Bosch O, Camarero JJ, Gutiérrez E. 2006. Increasing aridity is enhancing silver fir (*Abies alba* Mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climatic Change* 79, 289-313.
- Maire R. 1952. Flore de l'Afrique du Nord. Encyclopédie biologique. Volume 1. Editions Paul Lechevalier, Paris. 366 pp.
- Meddi M, Toumi S. 2013. Study of the interannual rainfall variability in northern Algeria. *LJEE* 23, 40-59.
- Meddour R. 1994. La cédraie de l'Atlas blidéen (Algérie). Valeur bioclimatique, syntaxonomique et dynamique. *Ann. Rech. For.* 27, 105-127.
- Meddour R. 2010. Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie. Exemple des groupements forestiers et préforestiers de la Kabylie Djurdjuréenne. Thèse de Doctorat d'État. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou. 397 pp.
- Meddour-Sahar O, Meddour R, Derridj A. 2008. Analyse des feux de forêts en Algérie sur le temps long (1876-2007). *Les Notes d'analyse du CIHEAM* 39, 11 pp.
- Meddour-Sahar O, Meddour R, Leone V, Lovreglio R, Derridj A. 2013. Analysis of forest fires causes and their motivations in northern Algeria: the Delphi method. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, doi: 10.3832/ifor0098-006.
- Megdoud A. 2012. Évaluation de l'impact des changements climatiques sur la diversité biologique, la dynamique et la structure de la cédraie du Belezma (Batna). Mémoire de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger. 126 pp.
- Meharzi MK. 1994. Le rôle de l'orographie dans la répartition spatiale des précipitations dans le massif de l'Aurès. *Méditerranée* 3 (4), 73-78.

- Meko DM, Touchan R, Anchukaitis KJ. 2011. Seascorr: A MATLAB program for identifying the seasonal climate signal in an annual tree-ring time series. *Computers & Geosciences* 37, 1234-124.
- Messaoudène M. 1989. Approche dendroclimatologique et productivité de *Quercus afares* Pomel et *Quercus canariensis* Willd. Dans les massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni-Ghobri en Algérie. Thèse de Doctorat. Université Aix-Marseille III. 123 pp.
- Messaoudène M, Loukkas A, Janin G, Tafer M, Dilem A, Gonzalez J. 2004. Propriétés physiques du bois d'éclaircie des cèdres (*Cedrus atlantica*), contenant du bois de compression, provenant de l'Atlas du Djurdjura (Algérie). *Ann. For. Sci.* 61 589-595, doi : 10.1051/forest:2004054.
- Messaoudène M, Tessier L. 1997. Relations cerne-climat dans des peuplements de *Quercus afares* Willd et *Quercus canariensis* Pomel en Algérie. *Annales des Sciences forestières* 54, 347-358.
- 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* 27, 3-21.
- M'Hirit O. 1999. Le cèdre de l'Atlas à travers le réseau *Silva mediterranea* « Cèdre ». *Bilan et perspectives. Forêt Méditerranéenne* 10 (3), 91-99.
- M'Hirit O, Benzyane M. 2006. Le cèdre de l'Atlas : mémoire du temps. Éditions Mardaga. 288 pp.
- Montenegro G, Ginocchio R, Segura A, Keely JE, Gómez M. 2004. Fire regimes and vegetation responses in two Mediterranean-climate regions. *Revista Chilena de Historia Natural* 77, 455-464.
- Mooney CZ, Duval RD. 1993. Bootstrapping: A nonparametric approach to statistical inference. *Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences* 95, 72 pp.
- Mouna M. 1994. État des connaissances sur l'entomofaune du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au Maroc. *Ann. Rech. For. Maroc* 27, 513-526.
- Mundo IA, Kitzberger T, Roig Juñent FA, Villalba R, Barrera MD. 2013. Fire history in the *Araucaria araucana* forests of Argentina : human and climate influences. *International Journal of Wildland Fire* 22, 194–206, <http://dx.doi.org/10.1071/WF11164> [21/09/ 2014].
- Nageleisen LM. 2007. Les problèmes phytosanitaires du cèdre en France. *Forêt Entreprise* 174, 27-31.

- Naveh Z. 1974. Effects of fire in the Mediterranean regions, *in*: Kozlowski TT, Ahlgren CE. Fire and Ecosystems. Academic Press. New York, pp. 104-434.
- Naveh Z. 1975. The evolution significance of fire in the Mediterranean region. *Vegetatio* 29, 199-208.
- Ne'eman G, Goubitz S, Nathan R. 2004. Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire - a critical review. *Plant Ecology* 171, 69-79.
- Nezar Kebaili M. 2009. Influence de quelques variables du milieu sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma (Batna). Mémoire de Magister. Université Hadj Lakhdar, Batna. 84 pp.
- Nicault A, Alleaume S, Brewer S, Carrer M, Nola P, Guiot J. 2008. Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-007-0349-3.
- Niklasson M, Zin E, Zielonka T, Feijen M, Korczyk, Churski M, *et al.* 2010. A 350-year tree-ring fire record from Białowieża Primeval Forest, Poland: implications for Central European lowland fire history. *Journal of Ecology* 98, 1319–1329, doi: 10.1111/j.1365-2745.2010.01710.x.
- Oliveira S, Fernandes P. 2009. Regeneration of *Pinus* and *Quercus* after fire in Mediterranean-type ecosystems: natural mechanisms and management practices. *Silva Lusitana* 17(2), 181-192.
- Parent S, Morin H, Messier C. 2002. Missing growth rings at the trunk base in suppressed balsam fir saplings. *Can. J. For. Res.* 32: 1776–1783, doi: 10.1139/X02-102.
- Philippe G, Baldet P, Héois B, Ginisty C. 2006. Reproduction sexuée des conifères et production de semences en vergers à graines. Éditions Quae, Anthony, 570 pp.
- Planells O, Andreu L, Bosch O, Gutiérrez E, Filot M, Leuenberger M, *et al.* 2005. The potential of stable isotopes to record aridity conditions in a forest with low-sensitive rings widths from the eastern Pre-Pyrenees. *TRACE proceedings* 4, 266-272.
- PNUD. 2009. Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. 19 pp.
- Putod R. 1979. Le cèdre de l'Atlas en France. *Bull. de vulgarisation For.* 75 pp.
- Quézel P. 1998. Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : Signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt Méditerranéenne* 19 (3), 243-260.
- Quézel P, Santa S. 1962-1963. Nouvelle flore d'Algérie et des régions désertiques méridionales. Tome I et II. Éd. CNRS. Paris. 1170 pp.
- Remini B. 2010. La problématique de l'eau en Algérie du Nord. *Larhyss Journal* 8, 27-46.

- Resco de Dios V, Fischer C, Colinas C. 2007. Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New Forests* 33, 9-40, doi: 10.1007/s11056-006-9011-x.
- Sabatier S, Baradat P, Barthelemy D. 2003. Intra- and interspecific variations of polycyclism in young trees of *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex. Carrière and *Cedrus libani* A. Rich (Pinaceae). *Ann. For. Sci.* 60, 19-29, doi: 10.1051/forest:2002070.
- Safar W. 1994. Contribution à l'étude dendroécologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) dans une région semi-aride d'Algérie : l'Atlas Saharien (Ouled Nail-Aurès-Hodna). Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille III. 215 pp.
- Safar W, Serre-Bachet F, Tessier L. 1992. Les plus vieux pins d'Alep vivants connus. *Dendrochronologia* 10, 41-52.
- Sarmoum M. 2008. Impact du climat sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Diagnostic dendroécologique et climatique de la cédraie de Theniet El Had (Wilaya de Tissemsilt). Mémoire de Magister. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger. 98 pp.
- Sherriff RL, Veblen TT. 2007. A spatially explicit reconstruction of historical fire occurrence in the ponderosa pine zone of the Colorado Front Range. *Ecosystems* 9, 1342-347.
- Slimani S. 2002. Évolution de la végétation et de quelques éléments biogènes de la couche superficielle du sol de la subéraie littorale de Bouhatem (Béjaïa), après feu. Mémoire de Magister. Université Abderrahmane Mira, Béjaïa. 79 pp.
- Slimani S, Derridj A, Gutiérrez E. 2014. Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria). *Forest Systems* 23 (3) : 448-460. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2014233-05175>
- Stokes MA, Smiley TL. 1996. An Introduction to Tree-ring Dating. The University of Arizona, Tucson Press, Tucson, Arizona. 73 pp.
- Swetnam TW, Allen CD, Betancourt JL. 1999. Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological Applications* 9, 1189-1206.
- Swetnam TW, Baisan CH. 1996. Historical fire regime patterns in the southwestern United States since A.D. 1700, *in*: Allen CD. Proceedings of the 2nd La Mesa Fire Symposium, March 29-31, 1994, Los Alamos, New Mexico. U.S. Department of Agriculture Forest Service RM-GTR-286. Rocky Mountain Forest and Range Research Station, Fort Collins, Colorado-USA, pp. 11-32.

- Swetnam TW, Baisan CH, Caprio AC, Brown PM, Touchan R, Anderson RS, *et al.* 2009. Multi-millennial fire history of the Giant Forest, Sequoia National Park, California, USA. *Fire Ecology* 5, 120-150.
- Swetnam TW, Touchan R, Baisan CH, Caprio AC, Brown PM. 1991. Giant Sequoia Fire History in Mariposa Grove, Yosemite National Park pp. 249-253. Yosemite Centennial Symposium Proceedings - A Global Issues Symposium Joining the 17th Annual Natural Areas Conference with the Yosemite Centennial Celebration Oct. 13-20, 1990. pp. 667.
- Talbi Y. 2010. Contribution à l'étude des insectes associés au dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans la région de Batna : cas de la cédraie de Belezma. Mémoire de Magister. Université Hadj Lakhdar, Batna. 115 pp.
- Tardif J, Camarero JJ, Ribas M, Gutiérrez E. 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the central Pyrenees: climatic and site influences. *Ecological Monographs* 73 (2), 241-257.
- Taylor DL. 1980. Fire history and man-induced fire problems in subtropical South Florida. *In: Proceedings of the Fire History Workshop, October 20-24, 1980, Tucson, Arizona. U.S. Department of Agriculture General Technical Report RM-81.* pp. 63-68.
- Taylor AH, Trouet V, Skinner CN. 2008. Climatic influences on fire regimes in montane forests of the Southern Cascades, California USA. *International Journal of Wildland Fire* 17, 60-71.
- Tessier L. 1982. Analyse dendroclimatologique comparée de six populations de *Pinus silvestris* L. dans la Drôme. *Ecologia mediterranea* 8 (3), 185-202.
- Till C. 1987. The summary response function of *Cedrus atlantica* in Morocco. *Tree-Ring Bull.* 47, 23-36.
- Till C, Guiot J. 1990. Reconstruction of precipitation in Morocco since 1100 A.D. based on *Cedrus atlantica* tree-ring widths. *Quaternary Research* 33, 337-351.
- Tinthoin R. 1946. Algérie 1945. *In : L'information géographique*, 10 (4),133-143.
- Toth J. 1980. Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays à grande importance forestière. *Forêt Méditerranéenne* 2 (1), 23-30.
- Toth J. 2005. Le cèdre de France. Étude approfondie de l'espèce. L'Harmattan, Paris. 207 pp.
- Touazi M, Laborde JP. 2004. Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du Nord. *Rev. Sci. Eau* 17 (4), 503-516.

- Touchan R, Allen CD, Swetnam TW. 1996. Fire history and climatic patterns in ponderosa pine and mixed-conifer forests of the Jemez Mountains, northern New Mexico, *in*: Allen CD, ed., *Fire Effects in Southwestern Forests: Proceedings of the Second La Mesa Fire Symposium*. USDA Forest Service General Technical Report RM-GTR-286. pp. 33-46.
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Attalah S, Baisan C, Aloui A. 2008a. Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical Research Letters* 35, L13705. doi:10.1029/2008GL034264.
- Touchan R, Anchukaitis KJ, Meko DM, Sabir M, Attalah S, Aloui A. 2010. Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s0038260106080464.
- Touchan R, Christou AK, Meko DM. 2014. Six centuries of May–July precipitation in Cyprus from tree rings. *Clim Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-014-2104-x.
- Touchan R, Funkhouser G, Hughes MK, Erkan N. 2005b. Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change* 72: 339-353, doi: 10.1007/s10584-005-5358-9.
- Touchan R, Garfin GM, Meko DM, Funkhouser G, Erkan N, Hughes MK, *et al.* 2003. Preliminary reconstructions of spring precipitation in Southwestern turkey from tree-ring width. *Int. J. Climatol.* 23, 157-171, doi: 10.1002/joc.850.
- Touchan R, Hughes M. 2000. The role of dendrochronology in natural resource management. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-13*, pp. 277-281.
- Touchan R, Meko DM, Aloui A. 2008b. Precipitation reconstruction for northwestern Tunisia from tree rings. *Journal of Arid Environments* 72, 1887-1896.
- Touchan R, Meko DM, Hughes MK. 1999. A 396-year reconstruction of precipitation in southern Jordan. *Journal of the American Water Resources Association* 35 (1), 49-59.
- Touchan R, Swetnam TW. 1995. Fire history in ponderosa pine and mixed-conifer forests of the Jemez Mountains, northern New Mexico. Final report, USDA Forest Service and USDI National Park Service, Bandelier National Monument, Los Alamos, NM. pp. 85.
- Touchan R, Swetnam TW, Grissino-Mayer HD. 1995. Effects of livestock grazing on presettlement fire regimes in New Mexico, *in*: *Symposium on fire in wilderness and park management*, Missoula, MT, 30 March-1 April 1993. USDA Forest Service, General Technical Report INT-320. pp. 268-272.

- Touchan R, Xoplaki E, Funkhouser G, Luterbacher J, Hughes MK, Erkan N, *et al.*, 2005a. Reconstructions of spring/summer precipitation for the Eastern Mediterranean from tree-ring widths and its connection to large-scale atmospheric circulation. *Climate Dynamics* 25, 75-98, doi: 10.1007/s00382-005-0016-5.
- Trabaud L. 1994. Postfire Plant community dynamics in the Mediterranean Basin, *in*: The role of fire in Mediterranean-type ecosystems. Moreno JM, Oechel WC, ed. Springer Verlag, New York, pp.1-15.
- Turco M, Llasat MC, Tudela A, Castro X, Provenzale A., 2013. Decreasing fires in a Mediterranean region (1970–2010, NE Spain). *Natural Hazard and Earth System Science* 13 (3), 649-652.
- Valette JC. 1990. Inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes. Conséquences sur la combustibilité des formations forestières. *Revue Forestière Française XLII*, n° spécial « espaces forestiers et incendies », 76-92.
- Wagner WW. 1961. Past fire incidence in Sierra Nevada forests. *Journal of Forestry* 59, 739-748.
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23, 201-213.
- Wilmking M, Hallinger M, Van Bogaert R, Kyncl T, Babst F, Hahne W, *et al.* 2012. Continuously missing outer rings in woody plants at their distributional margins. *Dendrochronologia* 30, 213-222.
- Yachir F, Abdoun R. 1986. Dépendance alimentaire, croissance agricole et équilibre externe en Algérie. *Annuaire de l'Afrique du Nord*. CNRS-Editions, Paris 23, 533-541.
- Yamaguchi DK, Brunstein FC. 1991. Special sanding films and sandpapers for surfacing narrow-ring increment cores. *Tree Ring Bulletin* 51, 43-46.
- Zackrisson O. 1977. Influence of forest fires on the north Swedish boreal forest. *Oikos* 29, 22-32.

Annexes

Annexes

Annexe 3.1. Fiche de terrain.

Date d'échantillonnage Code du site.....

Nom du site

Arbre N° Photo N°.....

Espèce : *Cedrus Atlantica* (CEAT)

Latitude Longitude Altitude (m)

Exposition Pente (%)

Taille de l'arbre : Ø (m) x hauteur (m)

Inclinaison (%) Densité du houppier [Faible / Moyenne / Dense]

Information sur la carotte

.....

Végétation

.....

.....

Collecteur (s)

Sens de la pente descendante

The diagram shows a central circle labeled 'Tronc de l'arbre'. Above it is an upward-pointing arrow labeled 'Sens de la pente descendante'. To the left, a rectangular box labeled 'Carotte B' has an arrow pointing towards the trunk. To the right, a rectangular box labeled 'Carotte A' has an arrow pointing towards the trunk.

Annexe 3.2. Précipitations mensuelles (en mm) exploitées pour la région des Aurès sur la période 1930-2009. Source : Station météorologique de Batna.

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1930	27,2	32,6	39,3	36,4	42,6	13,9	0,5	9,5	0,0	11,5	0,0	75,6
1931	64,2	55,7	7,2	21,1	26,3	12,4	0,0	16,7	28,5	8,8	18,7	56,0
1932	64,0	37,6	78,6	8,4	8,5	12,7	1,4	9,2	33,7	45,2	34,0	43,3
1933	19,4	20,7	94,2	11,7	48,2	10,1	9,3	28,2	12,7	11,6	98,1	66,7
1934	41,2	17,9	33,7	39,4	102,1	25,9	4,4	0,8	53,4	22,6	55,1	13,4
1935	65,2	22,1	40,9	69,5	38,7	7,5	5,8	18,7	43,6	82,6	17,9	47,9
1936	18,3	20,5	31,2	60,1	36,0	47,4	5,1	34,7	7,1	63,0	74,1	26,4
1937	7,1	15,9	23,4	16,6	18,0	5,8	0,0	36,1	16,8	16,5	10,5	29,4
1938	11,0	31,2	1,7	37,5	12,2	53,4	4,0	21,8	20,3	56,4	55,6	56,0
1939	8,9	102,0	37,2	111,0	91,6	33,0	5,8	26,0	22,0	7,3	96,7	4,4
1940	68,5	11,9	9,0	7,1	21,3	33,3	1,4	12,0	9,8	30,4	7,7	23,3
1941	23,3	23,0	32,6	34,7	68,0	0,1	13,5	28,8	72,2	36,0	48,5	8,4
1942	44,8	55,4	35,5	19,8	6,1	10,0	0,0	0,7	67,5	21,3	43,3	62,9
1943	9,3	52,2	38,3	68,6	9,0	9,6	6,0	13,4	25,5	5,5	4,3	50,8
1944	1,0	17,7	14,5	38,5	8,0	85,6	0,0	12,7	47,4	11,4	10,6	13,4
1945	37,0	1,9	10,6	0,0	27,1	5,9	29,0	4,0	15,3	30,6	20,9	31,2
1946	36,6	6,0	9,2	52,9	28,3	21,3	2,7	3,2	10,0	2,5	43,5	20,0
1947	9,9	22,4	5,7	32,9	10,7	2,1	10,1	40,6	27,3	46,9	7,6	27,7
1948	44,9	20,2	28,8	13,9	41,4	26,9	0,1	0,9	18,3	51,8	9,0	15,4
1949	54,5	23,4	45,9	35,8	20,0	6,7	0,0	0,0	3,2	3,0	19,6	54,1
1950	28,0	17,7	13,4	30,0	13,3	7,8	1,3	32,6	91,7	55,7	10,6	64,4
1951	59,5	28,6	30,1	5,7	61,8	4,0	7,5	6,6	31,8	33,9	16,8	70,3
1952	35,9	17,5	20,0	15,0	51,0	5,0	16,9	13,6	50,9	8,3	8,2	8,0
1953	29,5	18,8	78,0	11,4	20,1	44,7	14,3	18,4	21,2	39,7	26,8	16,4
1954	31,8	26,4	78,6	82,3	19,4	24,0	9,0	0,0	6,1	13,5	9,0	28,0
1955	18,0	37,2	13,4	80,8	64,6	10,1	0,0	11,1	24,1	37,1	3,2	6,7
1956	13,1	79,3	46,4	35,7	57,5	0,0	0,0	3,0	2,2	20,5	24,5	3,4
1957	21,9	0,0	22,4	71,6	76,9	45,4	28,8	5,5	42,8	112,0	84,3	47,6
1958	67,2	10,0	10,7	29,5	0,0	19,1	0,0	56,0	52,5	40,5	72,5	55,0
1959	1,5	55,3	27,7	51,5	47,6	37,3	12,6	6,5	41,1	33,5	36,1	39,6
1960	56,8	18,8	33,3	97,4	53,5	68,8	11,9	1,3	0,0	2,8	8,8	70,5
1961	53,4	4,2	10,0	14,3	3,5	40,8	28,8	36,6	4,0	1,5	37,7	14,7
1962	7,7	55,8	31,2	53,1	48,8	34,4	1,6	16,6	8,0	21,8	59,5	34,6
1963	19,4	93,7	72,5	59,2	47,1	97,5	18,8	7,8	85,0	5,4	0,0	97,3
1964	114,7	35,2	49,4	72,4	16,6	18,6	5,9	72,7	4,2	40,9	29,6	40,5
1965	54,2	14,5	39,6	17,9	22,0	21,7	5,7	17,6	78,8	39,8	19,2	83,9
1966	6,1	17,9	12,0	38,7	65,8	14,3	2,7	2,8	8,0	28,7	32,6	3,6
1967	8,1	21,1	13,9	16,7	34,8	2,9	3,3	20,0	60,2	5,0	146,5	56,5
1968	46,5	27,0	34,2	33,6	16,9	56,2	4,2	7,4	0,9	0,0	21,6	68,9
1969	48,3	34,0	48,5	31,7	36,5	3,8	4,2	11,5	97,7	143,0	11,3	66,2
1970	34,9	5,6	19,6	109,5	56,7	3,1	22,4	9,7	9,6	11,4	0,0	37,4
1971	53,5	36,0	27,3	5,5	64,3	3,6	6,9	5,7	41,7	21,5	59,4	36,8

Annexe 3.2. Suite.

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1972	74,9	29,9	60,7	81,2	66,3	28,9	1,9	43,3	93,9	81,3	21,5	59,2
1973	44,1	43,2	75,6	43,4	4,4	28,5	5,2	20,9	19,1	8,3	23,2	102,5
1974	7,2	37,8	53,4	34,5	3,4	14,1	2,2	6,6	22,4	22,9	66,3	12,8
1975	22,4	73,0	50,5	21,2	51,1	0,2	4,4	14,1	45,5	3,4	49,9	16,4
1976	24,1	57,6	68,4	43,1	56,4	68,7	41,3	15,5	55,8	32,8	62,8	24,3
1977	48,7	2,8	18,3	43,5	76,6	26,4	0,0	34,1	4,5	1,9	65,4	4,5
1978	10,6	33,1	9,4	32,2	16,8	7,0	0,0	36,0	16,7	46,5	4,5	3,9
1979	37,0	39,1	19,7	71,0	13,7	24,3	8,3	8,3	26,0	31,2	20,0	3,6
1980	15,6	39,6	57,9	38,0	54,8	6,7	0,1	12,8	59,2	9,9	68,3	87,6
1981	5,7	29,6	34,7	10,8	6,3	11,7	0,0	13,6	28,4	28,5	3,0	21,7
1982	23,9	29,0	41,5	91,6	44,7	52,2	0,3	13,6	64,8	43,5	117,5	21,0
1983	1,5	20,0	25,0	6,0	7,7	18,1	0,5	10,4	51,3	13,2	10,0	12,7
1984	42,2	86,5	17,6	31,5	0,7	13,8	0,0	28,2	4,9	80,9	6,7	47,9
1985	55,4	16,9	100,3	17,0	82,2	0,1	0,0	0,0	94,8	52,0	48,6	22,8
1986	46,4	14,6	97,2	18,1	16,5	19,5	0,3	4,8	65,6	31,3	23,0	29,2
1987	25,1	38,0	14,5	14,3	26,9	14,5	56,3	0,1	14,1	24,1	27,3	61,5
1988	4,0	6,3	17,1	19,7	15,9	36,7	1,8	9,6	13,8	6,3	28,8	63,9
1989	9,2	27,6	14,5	39,6	40,8	93,9	3,3	63,4	39,2	4,7	3,7	20,4
1990	129,6	0,0	53,7	90,6	117,1	7,9	18,0	14,3	44,2	8,0	44,3	42,2
1991	5,0	30,4	103,2	50,8	63,8	28,0	40,4	4,6	21,1	84,2	14,9	13,5
1992	36,0	24,4	63,4	46,6	63,4	2,0	12,7	1,2	38,2	13,2	77,4	59,5
1993	11,7	47,0	22,5	4,6	30,1	11,2	0,9	0,8	4,8	4,6	22,6	39,3
1994	16,4	25,9	37,5	16,5	10,7	0,0	1,8	1,9	121,2	37,3	8,5	9,1
1995	46,2	12,5	30,3	8,8	20,3	44,8	5,8	4,7	93,5	38,7	5,4	20,4
1996	97,5	87,3	60,5	43,3	40,2	28,7	9,2	18,1	15,2	2,5	4,0	11,2
1997	23,7	3,2	14,9	49,9	0,3	22,9	8,5	20,3	137,2	33,9	93,4	52,5
1998	14,0	19,1	13,0	58,6	31,1	14,2	5,4	16,6	19,5	13,4	27,2	15,2
1999	61,7	16,9	15,1	10,5	13,6	12,1	6,2	17,4	43,8	36,4	74,6	63,6
2000	14,2	2,7	4,6	3,6	34,1	13,3	0,0	31,5	49,4	12,9	15,2	45,5
2001	40,0	18,2	2,9	5,5	58,6	0,0	5,5	12,0	63,9	18,1	20,6	9,7
2002	16,8	3,5	15,6	41,0	17,7	15,8	6,0	12,8	0,0	15,0	76,0	32,1
2003	101,7	17,7	20,7	112,1	36,7	41,0	8,0	22,8	23,3	96,0	15,6	44,9
2004	20,3	12,7	74,3	63,7	90,8	72,1	2,2	42,6	8,4	26,9	93,9	115,2
2005	16,0	64,6	29,0	35,3	5,5	26,3	1,8	3,2	18,4	11,2	41,5	33,4
2006	61,2	44,8	14,1	125,9	46,9	0,4	39,7	9,5	29,0	5,2	24,7	36,9
2007	17,9	21,9	55,7	36,7	14,3	3,8	2,4	9,8	64,3	27,5	2,6	50,1
2008	5,2	1,2	40,2	9,3	76,6	29,4	19,0	9,0	56,7	60,2	18,5	43,9
2009	66,6	13,5	33,3	75,2	51,6	0,3	6,4	14,2	45,2	22,6	3,1	5,3

Annexe 3.3. Précipitations mensuelles (en mm) exploitées pour la région de Kabylie sur la période 1982-2011. Source : Station météorologique de Tizi Ouzou.

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1982	215,3	140,4	25,5	11,5	30,0	2,3	0,0	1,5	89,1	75,1	211,9	157,7
1983	3,4	66,8	50,9	25,5	14,5	0,0	0,6	30,3	2,4	32,2	89,7	58,8
1984	119,8	152,6	74,7	31,0	77,5	12,3	0,0	0,0	34,3	114,1	30,4	179,7
1985	78,8	116,5	209,5	47,3	6,7	0,1	1,4	0,0	47,4	54,0	84,7	67,5
1986	191,0	239,1	73,2	7,9	22,8	13,5	1,4	0,0	27,4	48,4	106,9	99,7
1987	83,8	0,1	42,9	5,6	18,2	5,1	0,0	5,3	10,3	39,7	97,7	47,8
1988	37,9	43,4	86,2	68,9	14,8	24,0	11,1	0,0	58,0	5,2	82,5	251,7
1989	57,1	55,4	32,0	93,2	3,7	9,9	3,2	42,7	23,0	28,0	79,5	32,6
1990	80,7	0,0	40,6	88,4	89,5	21,7	18,5	0,0	11,4	55,7	63,9	229,9
1991	104,2	145,0	83,5	43,0	41,3	3,2	1,0	6,7	11,6	177,8	34,5	13,8
1992	145,3	40,9	94,0	170,0	62,5	33,1	7,3	0,2	6,7	80,0	94,9	195,3
1993	50,6	69,5	28,7	129,9	48,1	0,5	0,0	7,5	65,9	41,5	83,5	102,6
1994	114,4	80,9	1,6	59,9	3,5	0,4	0,0	10,3	129,4	70,4	17,5	138,6
1995	308,9	45,0	109,1	34,9	0,7	13,0	0,3	18,2	9,2	19,8	25,4	81,7
1996	156,0	219,0	63,2	157,9	55,1	22,4	8,6	7,8	37,7	102,3	64,8	76,4
1997	50,8	15,7	24,7	78,8	27,5	3,7	0,8	14,7	42,3	89,4	202,5	153,9
1998	49,8	163,6	64,9	98,5	231,8	1,0	0,0	2,8	34,8	87,1	132,7	93,1
1999	123,0	92,6	75,3	19,6	40,5	1,3	0,0	2,3	32,6	15,4	149,0	219,2
2000	20,5	5,1	6,5	38,3	56,7	6,4	0,0	0,2	5,4	51,8	78,4	68,6
2001	231,6	73,7	4,0	41,2	45,8	0,0	0,0	2,2	36,8	8,6	52,0	63,2
2002	81,1	33,2	47,2	53,9	46,1	1,7	2,9	2,8	31,0	31,9	211,2	274,1
2003	302,7	106,0	59,3	128,3	34,4	1,2	3,2	3,3	21,3	67,7	78,4	166,9
2004	127,9	52,3	109,9	86,4	146,0	4,6	0,0	10,2	36,0	36,9	106,9	158,3
2005	99,9	90,1	116,6	96,7	34,5	6,9	4,8	2,1	37,8	95,5	112,0	116,0
2006	113,6	182,1	33,3	20,6	77,5	5,6	1,0	3,1	35,3	18,3	7,1	169,7
2007	6,6	52,6	238,5	189,5	19,1	15,0	10,9	2,0	56,4	136,4	323,8	74,5
2008	21,6	8,1	83,1	37,9	80,5	14,2	8,4	0,0	34,3	62,7	188,7	109,2
2009	209,5	32,0	85,9	138,9	69,1	1,0	3,1	7,1	116,1	111,0	84,1	160,0
2010	81,8	58,7	93,5	90,9	53,3	27,4	2,0	26,2	15,2	95,0	148,6	86,1
2011	63,2	126,0	94,0	92,2	166,4	40,9	1,0	0,0	9,1	31,3	149,9	79,0

Annexe 3.4. Températures moyennes mensuelles (en °C) exploitées pour la région des Aurès sur la période 1972-2009. Source : Station météorologique de Batna.

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1972	4,2	6,4	8,9	9,0	12,7	21,0	23,9	22,9	18,2	12,8	9,6	4,6
1973	4,3	3,4	5,1	9,4	18,7	22,0	26,7	23,3	21,0	15,3	8,4	4,9
1974	5,6	5,0	8,2	9,1	17,7	22,6	23,1	23,8	19,9	11,7	8,5	5,2
1975	5,0	5,0	6,5	11,0	14,5	20,2	25,4	23,8	21,8	13,0	7,7	5,7
1976	3,9	5,1	5,9	10,4	14,9	19,3	23,3	24,2	18,8	13,1	6,4	6,8
1977	6,3	8,9	11,1	12,5	15,9	20,5	26,8	23,8	19,1	15,9	9,9	7,2
1978	3,9	8,2	8,5	11,4	15,4	22,0	24,8	24,0	19,6	11,7	7,1	8,5
1979	7,7	7,1	8,5	8,8	16,0	21,4	25,6	25,3	17,8	15,7	7,1	6,4
1980	5,0	6,8	8,1	9,7	13,4	21,7	24,4	25,8	20,9	13,2	9,5	3,7
1981	3,2	5,3	11,8	13,4	18,0	22,9	24,0	23,6	20,1	16,5	8,7	7,7
1982	6,4	6,4	8,2	10,6	16,0	23,8	27,9	25,7	21,0	14,7	9,1	4,7
1983	4,7	5,3	8,4	13,8	17,6	22,3	26,8	26,0	21,0	14,8	11,3	6,2
1984	5,8	4,7	7,3	13,0	15,6	22,3	26,2	24,3	20,0	12,9	10,1	5,7
1985	3,4	9,2	6,6	13,0	15,2	24,4	27,3	25,1	19,8	14,3	11,1	6,3
1986	4,7	6,0	7,7	10,8	19,0	21,7	24,6	26,4	20,5	14,8	8,7	5,1
1987	4,4	6,0	8,5	14,2	16,0	23,2	26,1	26,9	22,9	17,8	9,0	8,2
1988	7,6	6,5	8,8	13,7	19,7	22,1	27,9	26,4	20,2	17,5	11,1	4,5
1989	3,5	6,4	10,6	12,0	17,6	20,6	25,5	25,9	21,6	15,6	12,7	10,3
1990	6,0	9,1	10,1	12,2	16,9	24,6	24,6	22,7	23,9	17,6	11,1	4,5
1991	4,2	5,7	10,8	10,1	13,4	21,8	25,7	24,9	22,0	15,8	9,5	4,4
1992	3,7	5,7	8,3	11,1	16,0	20,1	23,0	24,8	21,6	16,9	10,9	6,5
1993	3,4	5,0	7,8	11,7	17,7	23,9	26,2	26,0	21,4	18,0	9,9	6,4
1994	6,6	7,7	10,6	10,8	21,6	23,8	26,6	28,3	22,7	16,3	11,0	6,3
1995	5,0	8,9	8,5	11,3	18,7	22,6	26,4	24,1	20,5	15,7	10,5	9,2
1996	8,6	6,2	9,8	11,9	16,8	20,0	25,4	26,2	19,1	13,7	11,5	9,5
1997	7,5	8,1	8,5	12,3	20,3	25,9	26,6	25,3	20,4	15,8	11,1	7,4
1998	5,7	7,0	8,6	14,2	16,6	24,0	27,1	25,4	22,6	14,1	9,9	4,9
1999	6,2	4,9	9,3	13,9	21,8	25,6	25,9	29,2	23,2	18,7	9,9	6,5
2000	3,1	6,8	11,0	15,3	20,4	22,8	27,2	26,1	21,7	15,3	11,1	7,7
2001	6,9	6,3	15,0	12,8	18,5	24,4	27,8	26,7	21,7	19,9	10,2	5,5
2002	4,7	7,6	11,3	14,6	19,0	24,9	26,4	25,0	21,0	16,8	11,6	7,9
2003	5,9	5,8	9,9	13,9	18,0	24,9	28,9	27,0	21,0	18,6	11,1	5,9
2004	5,6	8,0	10,2	11,7	15,2	21,4	25,7	27,5	20,5	18,7	9,0	6,7
2005	3,4	4,2	10,8	13,4	19,9	23,9	28,1	25,5	21,2	16,8	10,7	6,0
2006	5,1	6,4	9,0	12,0	17,2	22,4	25,9	25,3	20,8	15,5	9,9	6,3
2007	6,7	8,6	8,8	13,6	18,0	25,4	27,2	27,0	21,2	16,6	9,5	5,4
2008	6,4	7,9	9,9	14,6	19,3	22,7	28,4	26,8	22,2	16,2	9,4	5,6
2009	6,2	6,1	9,5	11,0	17,6	23,6	29,2	26,7	20,4	15,3	10,8	9,4

Annexe 3.5. Températures moyennes mensuelles (en °C) exploitées pour la région de Kabylie sur la période 1990-2011. Source : Station météorologique de Tizi Ouzou.

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1990	10,2	13,2	13,9	14,4	18,8	24,8	26,7	27,3	27,1	20,2	14,1	9,0
1991	9,1	9,2	14,0	13,5	15,8	23,5	27,9	28,6	25,4	18,3	13,0	9,0
1992	8,5	10,0	11,6	14,4	18,7	20,8	25,5	27,6	24,9	18,0	14,3	10,8
1993	8,7	9,5	123,3	14,4	19,2	23,7	26,5	27,5	22,5	18,9	13,4	10,8
1994	10,0	11,1	14,6	13,8	21,4	24,4	29,7	30,9	24,0	19,7	15,2	10,8
1995	9,6	12,7	12,6	14,4	20,8	23,6	27,8	27,2	22,5	20,3	15,8	13,5
1996	12,9	9,9	13,1	15,4	18,4	22,6	26,3	26,8	21,6	165,9	14,8	12,4
1997	11,8	12,4	12,9	15,9	20,5	25,0	26,4	27,6	24,9	20,1	15,1	11,6
1998	10,7	12,0	13,2	15,7	18,0	24,1	27,6	27,7	24,6	17,4	13,7	9,8
1999	10,1	9,0	13,3	15,8	21,4	25,2	27,8	29,4	25,4	22,4	13,4	10,5
2000	8,2	11,7	14,3	16,6	21,6	24,9	28,9	29,4	25,0	18,5	14,6	12,1
2001	10,8	10,3	16,8	15,9	19,1	26,6	28,3	29,1	24,7	23,1	14,0	9,3
2002	9,8	11,4	13,7	15,4	20,1	25,8	26,9	27,6	23,9	20,1	15,2	12,9
2003	10,2	9,3	13,8	15,8	18,7	27,1	29,8	29,6	24,0	20,5	15,7	10,5
2004	10,6	12,2	12,6	14,8	16,6	23,9	27,2	28,7	25,2	22,5	13,3	12,2
2005	10,6	11,7	14,3	16,5	20,6	25,7	28,5	28,9	25,1	21,8	15,3	11,7
2006	9,2	10,1	14,1	18,3	21,9	24,8	28,7	26,7	24,0	22,2	17,2	12,0
2007	11,5	13,1	12,2	15,7	19,4	23,3	27,5	27,9	23,6	19,4	13,5	10,6
2008	11,0	12,3	13,0	16,3	18,9	23,3	27,9	27,7	24,3	19,8	13,6	10,4
2009	10,8	10,4	12,7	13,9	20,8	25,3	29,5	27,9	22,8	19,3	15,4	12,8
2010	11,4	12,8	13,7	16,3	17,8	22,5	27,7	27,2	23,6	19,2	14,3	11,1
2011	10,6	10,3	13,4	17,5	19,7	23,2	27,6	28,6	24,8	19,6	15,8	11,7

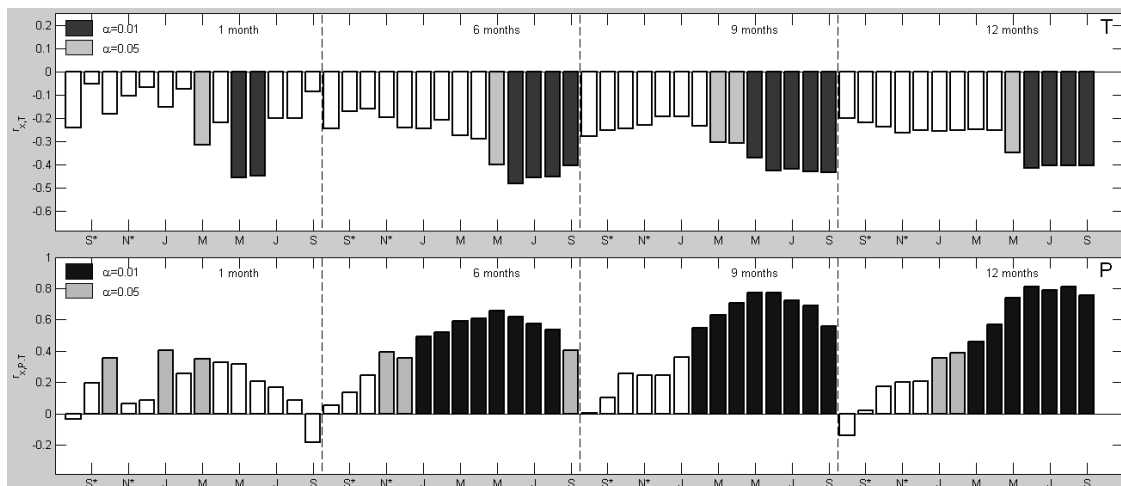
Annexe 3.6. Liste de cernes absents par arbre pour les huit sites d'étude. Le signe - indique que le cerne n'est pas manquant pour le site en question. Un blanc indique que la chronologie maîtresse ne couvre pas cette période.

Région des Aurès				Région de Kabylie			
THZ	ICH	TUG	GUE	LMO	DJT	TIG	REA
1501	-		-				
1515	-		-				
1517	-		-				
1526	1526		-				
-	1531		-				
1561	-		-				
1562	-		-				
1569	-		-				
1573	-		-				
1579	1579		-				
1585	-		-				
1604	1604		-			-	
1608	-		-			-	
1650	-		-		-	-	-
1661	-		-		-	-	-
-	1693		-		-	-	-
-	-	-	-		1698	-	-
-	-	-	-		-	1712	-
1750	-	-	-		-	-	-
1751	1751	-	-		-	-	-
1756	-	-	-	-	-	-	-
1768	-	-	-	-	-	-	-
1770	-	-	-	-	-	-	-
-	1780	-	-	-	-	-	-
1783	-	-	-	-	-	-	-
1785	-	-	-	-	-	-	-
1787	-	-	-	-	-	-	-
1789	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	1817	-	-
1822	-	-	-	-	-	-	-
-	-	1823	-	-	-	-	-
1828	1828	1828	-	-	-	-	-
1833	-	-	-	-	-	-	-
-	-	1840	-	-	-	-	-
-	1852	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	1855	-
-	-	-	-	-	-	1857	-
-	-	-	-	-	1858	1858	-
-	-	-	-	-	-	1859	-
-	1861	-	-	-	-	1861	-
1867	1867	-	-	-	-	-	-
1869	-	-	-	-	-	-	1869
-	-	-	-	-	-	-	1871

Annexe 3.6. Suite.

Région des Aurès				Région de Kabylie			
THZ	ICH	TUG	GUE	LMO	DJT	TIG	REA
-	1877	-	-	-	-	-	-
1879	1879	-	-	-	-	-	-
1892	1892	-	-	-	-	-	-
-	1898	-	-	-	-	-	-
1899	-	-	-	-	-	-	-
-	1901	-	-	-	-	-	-
-	1903	-	-	-	-	-	-
-	1904	-	-	-	-	1904	-
-	1906	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	1907	-
-	-	-	-	-	-	1909	-
-	-	-	-	-	-	1910	-
-	1916	-	-	-	-	-	-
-	1922	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	1928	-
-	-	-	-	-	-	1938	-
-	-	-	-	-	-	1939	-
1945	-	-	-	-	-	-	-
-	1947	-	-	-	-	-	-
-	-	-	1949	-	-	-	-
1951	-	-	-	-	-	-	-
1955	-	-	-	-	-	-	-
1957	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	1958	-	-	-	1958
-	-	-	1959	-	-	-	-
1961	1961	-	-	-	-	-	-
1978	1978	1978	-	-	-	-	-
-	-	1983	-	-	-	-	-
1988	1988	1988	-	-	-	-	-
-	-	1994	-	-	-	-	-
1997	-	-	1997	-	-	-	-
-	1998	-	-	-	-	-	-
1999	-	-	-	-	-	-	-
2001	2001	2001	2001	-	-	-	-
2002	2002	2002	2002	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	2005	-

Annexe 3.7. Corrélations entre les scores factoriels de la CP1 des chronologies de la région des Aurès et les variables climatiques saisonnières. En haut les corrélations avec la variable climatique primaire, la température (T). En bas les corrélations avec la variable climatique secondaire, les précipitations (P). L'astérisque (*) indique les mois de l'année t-1.



Annexe 3.8. Périodes présentant les plus fortes corrélations entre la CPI et la moyenne mensuelle des températures. r est le coefficient de corrélation de Pearson, ** indique un seuil α de 0,01.

Nombre de mois	Mois final	r	Probabilité de non dépassement
1	Mai	0,45	0,0022 **
6	Juin	0,48	0,0012 **
9	Sep	0,43	0,0020 **
12	Juin	0,41	0,0011 **

Annexe. 3.9. Stabilité temporelle de la corrélation entre la CP1 et la moyenne mensuelle des températures de la première à la deuxième sous-période d'analyse.

Mois	Corrélation ^a			Taille de l'échantillon ^b		Résultat du test ^c	
	Totale	1 ^{re} sous-période	2 ^e sous-période	N ₁	N ₂	ΔZ	p
Mai	-0,45	-0,22	0,63	18	18	0,5298	0,147
Jan-juin	-0,48	-0,17	0,74	18	18	0,7789	0,033
Jan-sep	-0,43	-0,16	0,65	18	18	0,6175	0,091
Juil*-juin	-0,41	-0,27	0,64	18	18	-0,4856	0,184

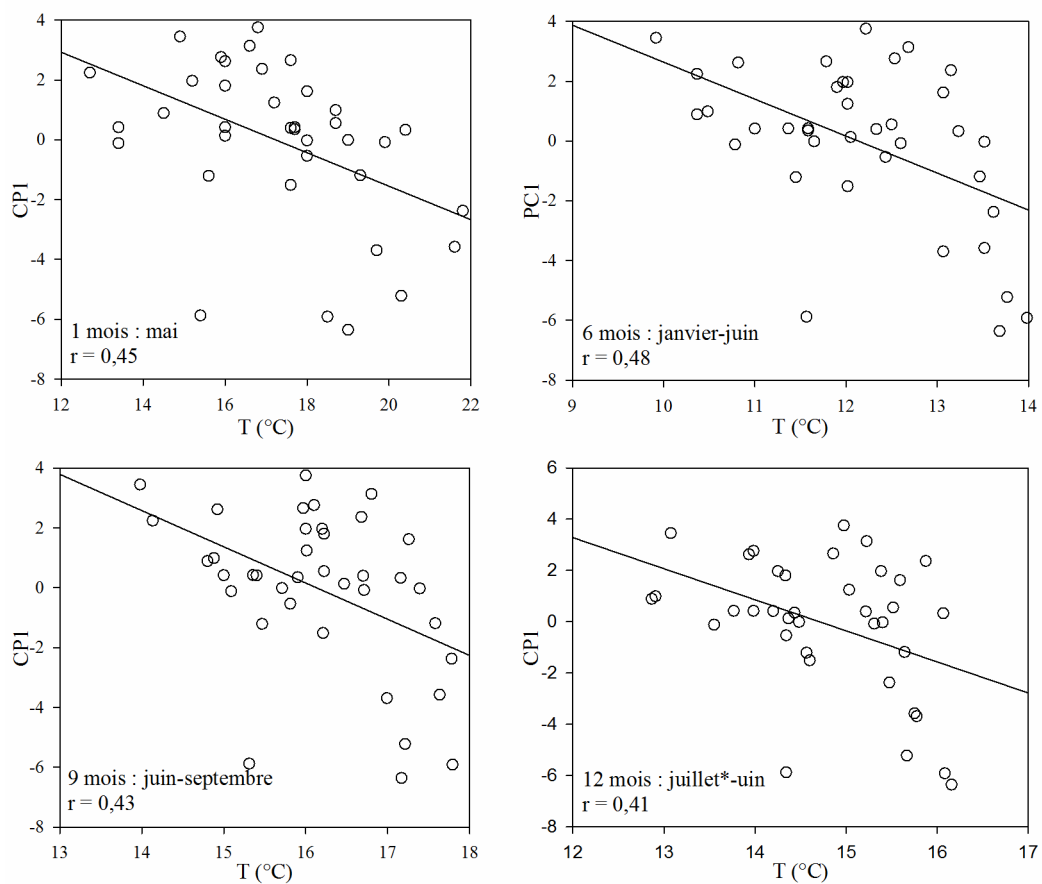
L'astérisque (*) indique les mois de l'année t-1.

^a : Les corrélations linéaires de Pearson sont calculées pour la période totale (1974-2009), la première sous-période (1974-1991) et la deuxième sous-période (1992-2009).

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

^c : ΔZ est la différence entre les corrélations transformées des deux sous-périodes selon Panofsky et Brier (1968) et Snedecor et Cochran (1989) in Meko *et al.* (2011). La dernière colonne présente la valeur-p pour tester l'hypothèse nulle indiquant que les échantillons de corrélations des deux sous-périodes proviennent de la même population. Une différence significative entre les corrélations des deux sous-périodes est indiquée par une faible valeur-p (ex. $p < 0,05$).

Annexe 3.10. Diagrammes de dispersions entre la CPI et la température (T) pour la région des Aurès.



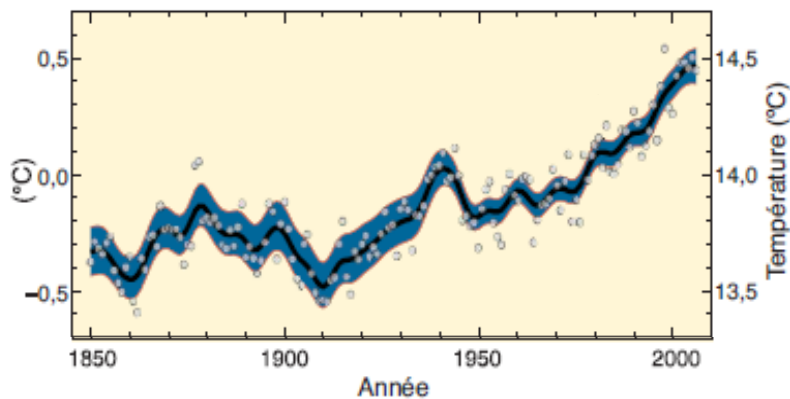
Annexe 3.11. Liste des années sèches. Le signe - indique que l'année n'est pas sèche pour la région en question. Un blanc indique que la reconstruction ne couvre pas cette période.

Région des Aurès	Région de Kabylie
1766	
1773	
1780	
1783	
1796	
1801	
1809	
1820	
1823	
1828	
1840	
1867	
1877	
1878	
1879	
-	1904
-	1907
1916	-
-	1922
1924	-
-	1928
-	1931
-	1942
1945	-
1947	1947
1961	1961
1967	-
1978	-
1988	-
1994	1994
1997	1997
1999	1999
-	2000
2001	-
2002	2002

Annexe 3.12. Liste des années humides. Le signe - indique que l'année n'est pas humide pour la région en question. Un blanc indique que la reconstruction ne couvre pas cette période.

Région des Aurès	Région de Kabylie
1762	
1771	
1776	
1781	
1799	
1803	
1804	
1810	
1818	
1849	
1851	
1865	
1870	
1876	
1884	
-	1899
1909	-
-	1948
1960	-
1968	-
1972	-
1976	1976
1977	-
1989	-
1990	
1992	1992
1996	1996
1998	1998
-	2008

Annexe 4.1. Variations observées de la température moyenne à la surface du globe. Tous les écarts sont calculés par rapport aux moyennes pour la période 1961-1990. Les courbes lissées représentent les moyennes décennales, et les cercles correspondent aux valeurs annuelles. Les zones ombrées représentent les intervalles d'incertitude qui ont été estimés à partir d'une analyse poussée des incertitudes connues (GIEC, 2007).



Appendix 5.1. Fire-scar data from fire-scarred cross sections from Oued Tider.

Series 1 : OUT01

Inner Ring : 1509
Outer Ring : 1887
Length of sample : 379
Number in final analysis : 379
Information on fire history :
1523 U fire scar
1552 A fire scar FI = 29
1611 L fire scar FI = 59
1620 A fire scar FI = 9
1627 U fire scar FI = 7
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 75.8
Sample mean fire interval : 26.0

Series 2 : OUT02

Pith Date : 1507
Outer Ring : 1782
Length of sample : 276
Number in final analysis : 276
Information on fire history :
1540 U fire scar
1551 U fire scar FI = 11
Total number of fire scars : 2
Total number all indicators : 2
Average number years per fire : 138.0
Sample mean fire interval : 11.0

Series 3 : OUT03

Pith Date : 1687
Outer Ring : 1843
Length of sample : 157
Number in final analysis : 157
Information on fire history :
1742 A fire scar
1773 A fire scar FI = 31
1802 D fire scar FI = 29
1818 A fire scar FI = 16
1830 U fire scar FI = 12
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 31.4
Sample mean fire interval : 22.0

Series 4 : OUT04

Pith Date : 1654
Outer Ring : 1830
Length of sample : 177
Number in final analysis : 177
Information on fire history :
1757 A fire scar
1765 A fire scar FI = 8
1829 A fire scar FI = 64
Total number of fire scars : 3
Total number all indicators : 3
Average number years per fire : 59.0
Sample mean fire interval : 36.0

Series 5 : OUT05

Inner Ring : 1531
Outer Ring : 1944
Length of sample : 414
Number in final analysis : 414
Information on fire history :
1577 U fire scar
1605 M fire scar FI = 28
1627 A fire scar FI = 22
1650 L fire scar FI = 23
1928 A fire scar FI = 278
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 82.8
Sample mean fire interval : 87.7

Series 6 : OUT06

Pith Date : 1604
Outer Ring : 1829
Length of sample : 226
Number in final analysis : 226
Information on fire history :
1683 A fire scar
1699 A fire scar FI = 16
1715 A fire scar FI = 16
1723 A fire scar FI = 8
1751 U fire scar FI = 28
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 45.2
Sample mean fire interval : 17.0

Appendix 5.1. Continued.

Series 7 : OUT07

Pith Date : 1685
Outer Ring : 1977
Length of sample : 293
Number in final analysis : 293
Information on fire history :
1848 U fire scar
Total number of fire scars : 1
Total number all indicators : 1
Average number years per fire : 293.0

Series 8 : OUT08

Pith Date : 1508
Outer Ring : 1630
Length of sample : 123
Number in final analysis : 123
Information on fire history :
1556 L fire scar
1585 L fire scar FI = 29
1595 L fire scar FI = 10
Total number of fire scars : 3
Total number all indicators : 3
Average number years per fire : 41.0
Sample mean fire interval : 19.5

Series 9 : OUT09

Inner Ring : 1568
Outer Ring : 1864
Length of sample : 297
Number in final analysis : 297
Information on fire history :
1595 A fire scar
1604 L fire scar FI = 9
1622 A fire scar FI = 18
1627 A fire scar FI = 5
1682 U fire scar FI = 55
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 59.4
Sample mean fire interval : 21.7

Series 10 : OUT10

Pith Date : 1652
Bark Date : 1950
Length of sample : 299
Number in final analysis : 299

Information on fire history :

1710 A fire scar
1770 A fire scar FI = 60
1830 U fire scar FI = 60
1907 A fire scar FI = 77
Total number of fire scars : 4
Total number all indicators : 4
Average number years per fire : 74.8
Sample mean fire interval : 65.7

Series 11 : OUT11

Pith Date : 1530
Outer Ring : 1631
Length of sample : 102
Number in final analysis : 102
Information on fire history :
1550 A fire scar
1552 L fire scar FI = 2
1572 A fire scar FI = 20
1585 A fire scar FI = 13
1590 A fire scar FI = 5
1596 A fire scar FI = 6
1621 L fire scar FI = 25
Total number of fire scars : 7
Total number all indicators : 7
Average number years per fire : 14.6
Sample mean fire interval : 11.8

Series 12 : OUT12

Pith Date : 1529
Outer Ring : 1674
Length of sample : 146
Number in final analysis : 146
Information on fire history :
1580 U fire scar
1595 A fire scar FI = 15
1620 U fire scar FI = 25
1638 A fire scar FI = 18
1658 A fire scar FI = 20
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 29.2
Sample mean fire interval : 19.5

Appendix 5.1. Continued.

Series 13 : OUT13

Pith Date : 1611

Outer Ring : 1854

Length of sample : 244

Number in final analysis : 244

Information on fire history :

1640 A fire scar

1643 A fire scar FI = 3

1667 A fire scar FI = 24

1682 A fire scar FI = 15

1713 A fire scar FI = 31

1721 U fire scar FI = 8

1791 U fire scar FI = 70

Total number of fire scars : 7

Total number all indicators : 7

Average number years per fire : 34.9

Sample mean fire interval : 25.2

Appendix 5.2. Fire-scar data from fire-scarred cross sections from Thniet Zemroune.

Series 1 : TI201

Pith Date : 1464
Outer Ring : 1830
Length of sample : 367
Number in final analysis : 367
Information on fire history :
1520 A fire scar
1544 A fire scar FI = 24
1547 A fire scar FI = 3
1559 A fire scar FI = 12
1639 A fire scar FI = 80
1677 L fire scar FI = 38
Total number of fire scars : 6
Total number all indicators : 6
Average number years per fire : 61.2
Sample mean fire interval : 31.4

Series 2 : TI203

Pith Date : 1367
Outer Ring : 1801
Length of sample : 435
Number in final analysis : 435
Information on fire history :
1446 E fire scar
1468 A fire scar FI = 22
1496 U fire scar FI = 28
Total number of fire scars : 3
Total number all indicators : 3
Average number years per fire : 145.0
Sample mean fire interval : 25.0

Series 3 : TI204

Pith Date : 1689
Outer Ring : 1834
Length of sample : 146
Number in final analysis : 146
Information on fire history :
1740 U fire scar
1762 U fire scar FI = 22
1784 U fire scar FI = 22
1807 U fire scar FI = 23
1826 U fire scar FI = 19
Total number of fire scars : 5
Total number all indicators : 5
Average number years per fire : 29.2
Sample mean fire interval : 21.5

Series 4 : TI205

Pith Date : 1633
Outer Ring : 1991
Length of sample : 359
Number in final analysis : 359
Information on fire history :
1647 U fire scar
1676 U fire scar FI = 29
1765 U fire scar FI = 89
1823 U fire scar FI = 58
Total number of fire scars : 4
Total number all indicators : 4
Average number years per fire : 89.8
Sample mean fire interval : 58.7

Series 5 : TI206

Inner Ring : 1667
Outer Ring : 1844
Length of sample : 178
Number in final analysis : 178
Information on fire history :
1763 U fire scar
1808 U fire scar FI = 45
Total number of fire scars : 2
Total number all indicators : 2
Average number years per fire : 89.0
Sample mean fire interval : 45.0

Appendix 5.2. Continued.

Series 6 : TI208

Pith Date : 1303

Outer Ring : 1924

Length of sample : 622

Number in final analysis : 622

Information on fire history :

1349 U fire scar

1362 U fire scar FI = 13

1406 U fire scar FI = 44

1445 U fire scar FI = 39

1462 U fire scar FI = 17

1509 U fire scar FI = 47

1553 A fire scar FI = 44

1599 E fire scar FI = 46

1639 A fire scar FI = 40

1661 E fire scar FI = 22

1698 U fire scar FI = 37

1710 U fire scar FI = 12

1750 U fire scar FI = 40

1792 U fire scar FI = 42

1893 U fire scar FI = 101

Total number of fire scars : 15

Total number all indicators : 15

Average number years per fire : 41.5

Sample mean fire interval : 38.9

Series 7 : TI209

Pith Date : 1308

Outer Ring : 1823

Length of sample : 516

Number in final analysis : 516

Information on fire history :

1349 U fire scar

1392 U fire scar FI = 43

1431 U fire scar FI = 39

1652 U fire scar FI = 221

1688 U fire scar FI = 36

1777 U fire scar FI = 89

Total number of fire scars : 6

Total number all indicators : 6

Average number years per fire : 86.0

Sample mean fire interval : 85.6

Series 8 : TI210

Inner Ring : 1400

Outer Ring : 1848

Length of sample : 449

Number in final analysis : 449

Information on fire history :

1565 U fire scar

1677 U fire scar FI = 112

1717 U fire scar FI = 40

Total number of fire scars : 3

Total number all indicators : 3

Average number years per fire : 149.7

Sample mean fire interval : 76.0

Series 9 : TI211

Pith Date : 1409

Outer Ring : 1632

Length of sample : 224

Number in final analysis : 224

Information on fire history :

1481 U fire scar

1490 U fire scar FI = 9

1518 U fire scar FI = 28

1556 U fire scar FI = 38

1586 U fire scar FI = 30

1621 U fire scar FI = 35

Total number of fire scars : 6

Total number all indicators : 6

Average number years per fire : 37.3

Sample mean fire interval : 28.0