



Reconstruction dendroclimatique de la variation de température moyenne avril-juillet depuis 1776 AD dans le Moyen Atlas, Maroc (A dendroclimatic reconstruction of april-july mean temperature variation in the Middle Atlas, Morocco, since 1776 AD)

R. Ilmen^{1,*}, A. Sabir¹, M. Benzyane²

¹Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Mohamed V Agdal, BP 1014 R.P, Rabat, Morocco

²Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification BP 605 Rabat-Chellah, Morocco

Received 26 May 2013, Revised 7 Sept 2013, Accepted 7 Sept 2013

* Corresponding author. E mail: ilmenrachid@gmail.com ; Tél: +212661469240.

Abstract

In Morocco, high-resolution tree-ring records covering the last hundreds years are very scarce, yet essential for understanding the process and pattern of climate change and designing climate model. In this paper, an Atlas Cedar (*Cedrus atlantica* M.) ring-width chronology spanning 1796-2011 AD and 1776-2011 AD was developed using standard dendroclimatological methods in two forest sites designed Tafechna and Ouiuane, respectively, at the Middle Atlas Mountains located in Khenifra province, Morocco. Trees in the second site are the oldest and strongly negative relationships were detected between the ring-width chronology and the monthly mean temperatures from June during the previous season to September during the growing season in this site. Based on correlation analysis, the mean temperature from April to July was reconstructed back to 1776 AD using a regression linear model. Therefore, 34% of the variance in temperature is reconstructed by this model. The reconstructed climate records show several alternating periods of high and low temperatures. Many of these hot years have been recorded to coincide with most of the known principal drought years of Morocco. The analysis of spatial correlation with the overall climate data, and comparisons with other temperature reconstructions based on tree rings surrounding areas, revealed that our reconstruction represented a regional variation on a larger scale temperature in the Middle Atlas region. Significant correlation between tree ring and climate is implying the possible influence of North Atlantic Oscillation (NAO) on the local climate. Considering the strong and negative between tree growth and temperature relationship, future warming will likely cause drought which will influence negatively the growth of trees as seen during the recent climate change experienced by Morocco since 1979. However, due to the limit of cedar age, the reconstruction couldn't save the changes to the millennial scale which requires the development in the future of long time series of tree rings in Morocco.

Keywords: Climate change, *Cedrus atlantica* M., ring width chronology, temperature reconstruction, Morocco.

Résumé

Au Maroc, les enregistrements des carottes d'arbres à haute résolution couvrant les dernières centaines d'années sont très rares, pourtant essentiels pour comprendre le processus et la variabilité du réchauffement planétaire et concevoir un modèle climatique. Dans cet article, une chronologie des cernes du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) allant, de 1796-2011 AD et de 1776-2011 AD, a été développée dans deux sites forestiers en l'occurrence Tafechna et Ouiuane, situés dans le Moyen Atlas, province de Khénifra, Maroc. Les arbres d'Ouiuane sont les plus âgés et des relations fortement négatives ont été détectées entre la chronologie de l'épaisseur des cernes et les températures moyennes mensuelles allant du mois de juin de la saison précédente au mois de septembre de la période de croissance dans ce site. En se basant sur l'analyse de corrélation, la température moyenne d'avril à juillet a été reconstruite à partir de l'année 1776 AD en utilisant un modèle de régression linéaire. Ainsi, 34 % de variance de la température a été reconstituée et expliquée par ledit modèle. Les courbes de reconstruction climatique montrent plusieurs périodes d'alternance entre des basses et hautes températures, la plupart de ces dernières coïncide avec des années de sécheresse connues au Maroc. L'analyse de corrélation spatiale avec l'ensemble de données climatiques, ainsi que des comparaisons avec autres reconstructions de température sur la base des cernes d'arbres des zones environnantes, ont révélé que notre reconstruction a représenté une variation régionale à plus grande échelle de température dans la région Moyen d'Atlas. La corrélation significative entre les cernes des arbres et le climat implique l'influence possible d'Oscillation Atlantique du Nord (NAO) sur le climat local. En considérant la relation forte et négative entre la croissance radiale des arbres et la température, le réchauffement futur causera probablement une sécheresse qui agira négativement sur l'accroissement des arbres comme constaté durant le récent dérèglement climatique qu'a connu le Maroc depuis 1979. Cependant, en raison de la limite d'âge des cèdres, cette reconstruction n'a pas pu enregistrer les variations à l'échelle millénaire ce qui nécessite de développer dans le futur de longues séries chronologiques des cernes d'arbres au Maroc.

Mots-clés: Changement climatique, *Cedrus atlantica* M., chronologie des cernes, reconstruction de température, Maroc.

1. Introduction

La dendroclimatologie est la discipline qui recherche les rapports des caractéristiques des cernes de croissance du tronc de l'arbre avec les facteurs climatiques [1]. Au Maroc, les premières études dendrochronologiques datent des années de 1974 à 1979, où un groupe de chercheurs belges a entrepris une campagne d'échantillonnage couvrant toute l'aire naturelle du cèdre de l'Atlas. Leur collection compte 5 sites d'*Abies maroccana* (Sapin du Maroc), 6 sites de *Cupressus atlantica* (Cyprés de l'Atlas), et 75 sites de *Cedrus atlantica* M. (Cèdre de l'Atlas) [2]. Suite à la sécheresse de 1979-1984 et dans le cadre d'un projet de reconstitution des sécheresses passées, 13 sites de cédraie ont été échantillonnés et 7 ont été datés [3]. Entre 1980 et 1990 une étude portant sur la dendroclimatologie du Chêne zéen (*Quercus canariensis* W.) a été conduite dans le Rif Occidental et le Moyen Atlas [4]. Par ailleurs, des recherches dendrochronologiques sur le cèdre de l'Atlas ont été réalisées dans plusieurs sites forestiers marocains dans le cadre de thèse doctorale [5]. Ces travaux ont été complétés et actualisés par un échantillonnage des sites marginaux où se trouvent les plus vieilles cédraies du Maroc [6].

Depuis 2006, Le laboratoire "Tree Ring Research" de l'Université d'Arizona a entrepris d'autres travaux de recherche axés sur la dendroclimatologie du cèdre et du pin dans les régions du Rif, Moyen Atlas, Haut Atlas et à l'Oriental. Actuellement, les forêts de cèdre sont soumises à un phénomène de dépérissement, ce qui semble être le résultat des facteurs biotiques et abiotiques qui pourraient être un indicateur fort des changements climatiques. L'étude rétrospective de la croissance radiale par rapport au déclin du peuplement de cèdre a permis d'analyser la dynamique spatiale et temporelle de sa disparition et la relation avec les facteurs écologiques et physiologiques [7]. D'autres études, sur la structure et la dynamique du cèdre au Moyen Atlas ont été également réalisées [8]. Plusieurs travaux de recherche antérieurs sont consacrés à d'autres espèces à potentiel dendroclimatologique mais moins longévives que le cèdre, ainsi la dendroécologie, la productivité et la dynamique de la croissance radiale du pin maritime (*Pinus pinaster* var. *maghrebiana*) ont été étudiées au Maroc [9]. Également une contribution à l'étude de la dendroécologie de *Juniperus thurifera* L. de la haute montagne méditerranéenne (Haut Atlas, Maroc) a été réalisée [10]. Généralement, les recherches dendrochronologiques sont rares au niveau du Maroc par rapport aux autres pays du bassin méditerranéen tels que la Turquie, l'Algérie et le Liban.

A notre connaissance, le cèdre de l'Atlas a rarement fait l'objet d'étude de reconstruction dendroclimatologique sur plusieurs siècles. A l'époque actuelle, cette espèce a pris une importance considérable dans le monde forestier du pourtour méditerranéen. De ce fait, il est apparu intéressant d'amorcer une étude climatique de ce conifère dont l'importance, au Maroc, se manifeste par la place de choix qui lui a été accordée dans la stratégie nationale en matière de reboisement et de reforestation. En effet, le Maroc est le pays qui détient la plus grande surface occupée par cette espèce estimée à 125.000 ha dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas Oriental, entre 1500 et 2800 m d'altitude, et à 15.000 ha dans le Rif [11]. Ces chiffres ne tiennent pas compte des reboisements récents effectués surtout dans le Rif. Dans le contexte des changements climatiques actuels, connaître les relations entre le climat et la croissance des arbres est primordial pour comprendre l'évolution des écosystèmes forestiers et élaborer des modèles mathématiques de croissance-climat. La présente étude vise à identifier les relations cerne-climat chez le cèdre des montagnes du Moyen Atlas marocain. Une reconstruction dendroclimatique sera réalisée en se basant sur les épaisseurs des cernes des carottes du cèdre. Ceci permettra d'améliorer la compréhension de la variabilité du climat au Maroc. Ainsi, les résultats de cette étude auront un intérêt tout particulier dans le contexte de changement climatique actuel, dont les effets seront probablement forts en région méditerranéenne.

2. Matériels et Méthodes

Le domaine forestier de la province de Khénifra occupe une place de choix aussi bien par son étendue que par les rôles socio-économiques, récréatifs et touristiques qu'il joue. Il est caractérisé par la diversité et la qualité des essences qu'il comporte dont notamment, le cèdre de l'Atlas qui représente 12% du domaine forestier de la province et 50 % environ des cédraies du Maroc [12]. Le cèdre est par excellence l'essence noble de l'Afrique du Nord et de l'Orient, par la majesté de son port, sa longévité et les souvenirs historiques qui s'y attachent.

2.1. Matériel dendrochronologique

Sur chaque site échantillonné, au moins deux carottes ont été prélevées parallèlement aux courbes de niveau à une hauteur de 1,3 m sur des arbres dominants ou co-dominants à l'aide d'une tarière de Pressler. Selon [13], le nombre d'arbres à échantillonner doit varier au moins de 12 à 20. Ce principe a été respecté lors du carottage des arbres dans Ouiuane et de Tafchna. Le tableau 1 présente une description des deux sites.

2.2. Développement de la chronologie des cernes

Les largeurs des cernes ont été mesurées à une précision de 0,01 mm à l'aide de la table Lintab au "Laboratoire de Technologie du Bois" à l'Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs (E.N.F.I) de Salé, ensuite, les carottes sont

visuellement et statistiquement datées avec le logiciel TSAPwin (version 0,53) [14]. On a attribué à chaque cerne une date de formation précise qui sera vérifiée par l'utilisation du Programme COFECHA qui détecte les erreurs potentielles susceptibles d'avoir lieu lors de l'interdatation [15]. Afin de faire ressortir les variations interannuelles du signal dendrochronologique, les séries individuelles ont été standardisées par le logiciel ARSTAN; les données brutes de largeur de cernes ont d'abord été ajustées par une courbe exponentielle négative de telle façon à enlever tous les âges non liés aux tendances non climatiques [16]. Cet ajustement permettra d'éliminer la variance à long terme, mais pourra conserver la variance sur des périodes allant jusqu'à un siècle en utilisant ces arbres. Puis, les épaisseurs brutes ont été divisées par les valeurs de courbe ajustée à l'âge cambiale pour dériver les séries des largeurs indicées.

Tableau 1 : Géographie, écologie, dendrométrie et climat des sites dendrochronologiques étudiés

Description	Tafechna	Ouiouane
Latitude (N)	32°56'664"	33°08'877"
Longitude (W)	5°28'565"	5°20'426"
Elevation (m)	1519	1722
Pente (°)	26	25
Exposition	Sud Ouest	Sud Est
Diamètre moyen des arbres (cm)	351	316
Hauteur moyenne des arbres (m)	24,15	24,7
Strate arborée	<i>Cedrus atlantica</i> M.	<i>Cedrus atlantica</i> M.
Strates arbustives et herbacées	<i>Lingula elongata</i>	<i>Hedera helix</i>
Substrat	Calcaire	Calcaro-dolomitique
Profondeur des sols (m)	Sol peu profond	Sol moyennement profond (litière)
Bioclimat	Subhumide à humide	Subhumide à humide

Les deux chronologies indicées réalisées à partir des épaisseurs brutes des cernes sont représentées dans la figure 1. La durée des chronologies varie de 216 ans (Tafechna : 1796-2011) à 236 ans (Ouiouane : 1776-2011). Les courbes des deux populations montrent clairement la tendance âge, c'est-à-dire une décroissance de l'épaisseur des cernes au fur et à mesure que les arbres vieillissent et que la circonférence du tronc augmente (figure 1).

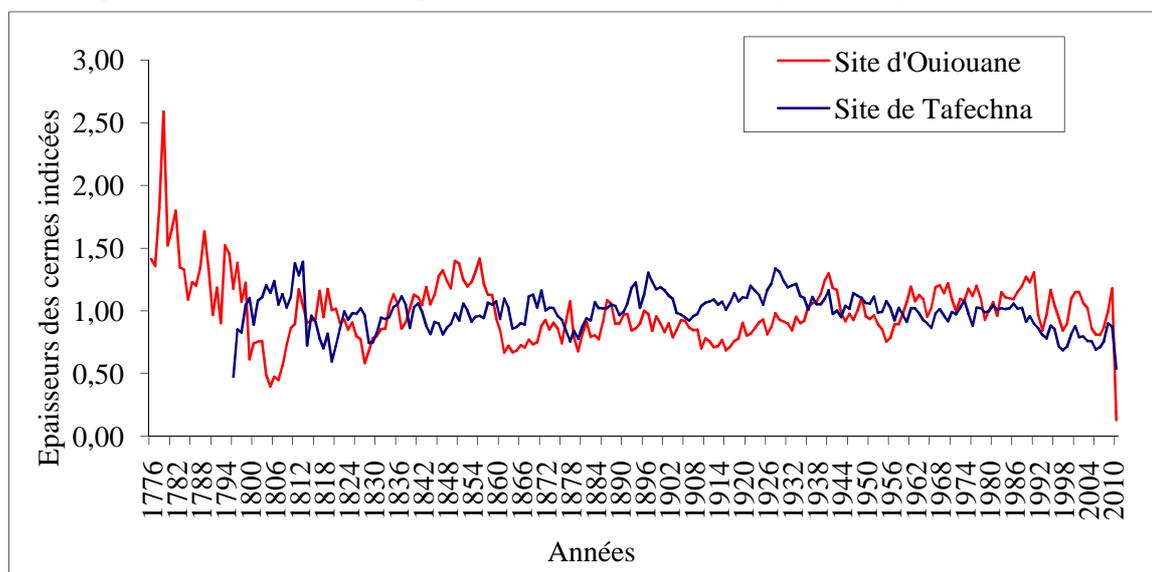


Figure 1 : Chronologies maîtresses indicées dans les deux sites dendrochronologiques

La comparaison des variations interannuelles sur les deux courbes (figure 1) montrent un bon synchronisme des chronologies maîtresses entre les deux sites. Les chronologies des cernes de croissance sont souvent moins fiables lorsque nous remontons plus loin dans le temps, car les arbres les plus anciens sont plus rares.

2.3. Acquisition des données climatiques

La température moyenne mensuelle et la moyenne des précipitations mensuelles (1958-2008) de la station météorologique d'Ouiouane ont été utilisées lors l'analyse de la relation croissance-climat. Ladite station est la plus

proche géographiquement du lieu de prélèvement et d'altitude similaire à celle des populations échantillonnées. Si on suppose que les variations climatiques sont homogènes dans la région d'étude [17], il semble alors possible de travailler avec des stations météorologiques assez éloignées du peuplement objet de l'étude [18]. Compte tenu de la situation des peuplements étudiés, ces données météorologiques fournissent le meilleur compromis pour la calibration des fonctions de réponse. Le maximum des précipitations mensuelles se trouve en décembre (3202,8 mm) et le minimum des précipitations s'observe en juillet (159,5 mm) durant la commune période 1958-2008. Les précipitations tombées entre décembre et avril représentent une part importante (48%) des précipitations annuelles. Les températures mensuelles varient en synchronie avec les précipitations; les hivers sont marqués par des températures froides et des précipitations de plus en plus accentuées, et les étés sont très chauds avec des précipitations faibles

2.4. Relations cernes-climat

La fonction de réponse est une régression linéaire orthogonalisée [19] dans laquelle les variables explicatives sont les données climatiques et les variables à expliquer sont les largeurs de cernes. Les données climatiques utilisées sont les 16 variables mensuelles de températures et de précipitations de juin de l'année t-1 à septembre de l'année t, correspondant à l'année biologique de l'espèce et étendues à l'été précédent, dont les conditions climatiques peuvent influencer sur la croissance de l'année t. Ainsi, les coefficients de corrélation de Pearson sont calculés sur toute la période adoptée.

2.5. Traitement et Analyse et statistique

Les variables statistiques telles que la sensibilité moyenne au climat (MS), L'écart-type (SD) qui mesure la variabilité des mesures à tous les largeurs de cernes ont été calculées. Aussi, le signal exprimé par les populations (EPS) qui représente la qualité d'une chronologie moyenne [20] est estimé par la formule :

$$EPS = \frac{n * R}{n * R + (1 - R)} \quad (4)$$

Où : R=Corrélation moyenne entre toutes les séries

n= Nombre des séries datées.

Dans les recherches dendroclimatiques, une valeur-seuil d'EPS>0.85 est généralement utilisée afin de déterminer quelle partie de la chronologie moyenne fiable et régionalement représentative [21]. Le Rapport Signal sur Bruit (Signal to Noise Ratio (S/N ratio) qui mesure la valeur statistique de la variance commune entre les arbres du même site a été calculée. Par ailleurs, la corrélation moyenne entre les arbres (R) a été calculée pour les chronologies de site afin de vérifier l'interdatation et la robustesse du signal climatique porté par chaque chronologie individuelle.

Pour tester la validité de la reconstruction et la reproductibilité des résultats d'un modèle, la calibration d'un modèle statistique, quel qu'il soit, est nécessaire et elle a besoin toujours de l'utilisation d'un grand nombre de données.

Afin d'évaluer la qualité du modèle linéaire pour la reconstruction climatique, la période des relevés de données climatiques entre 1958-2008 a été scindée en deux longues périodes : celle de calibration (1978-2008) et celle de vérification (1958-1977). La fiabilité et la qualité des prévisions du modèle ont été vérifiées en utilisant l'Erreur Réduite (RE) qui est un test très rigoureux à passer s'il existe des différences importantes entre les moyennes des deux périodes, les limites théoriques pour les valeurs de RE vont d'un maximum de +1 à moins l'infini, mais une valeur > 0 doit être considéré comme une puissance positive. Le Coefficient d'Efficiency (CE) qui permet de vérifier si nos reconstructions étaient statistiquement significatives [22] a été également calculé.

Par ailleurs, le logiciel SPSS (version 20) a été utilisé pour estimer les paramètres statistiques de contrôle de la qualité tels que le coefficient de corrélation de Pearson (R) utilisé pour évaluer le degré de relation entre la croissance annuelle de *Cedrus atlantica* et le climat. Le carré du coefficient de corrélation (R²) montre la proportion de la variance expliquée dans chaque chronologie appelée coefficient de détermination. Le Test de Signification (Sign Test) est également utilisé pour évaluer la capacité du modèle à suivre la variabilité interannuelle dans les données climatiques [23] et pour d'amples comparaisons entre les valeurs réelles et estimées.

Sur la base des résultats des analyses croissance des arbres-climat, la régression linéaire a été utilisée pour sélectionner la meilleure combinaison des cernes comme variables indépendantes et les conditions climatiques comme variables dépendantes dans le but d'élaborer un modèle pour le développement de la reconstruction.

3. Résultats et discussions

3.1. Développement de la chronologie

Les valeurs des différentes statistiques des chronologies après autorégression (version standard) sont représentées dans le tableau 2. La valeur d'EPS est > 0,75 dès le début des années 1870, signifiant que nous avons environ 75% de signal et 25% de bruit. Dès les années 1904, l'indice augmente à 0,91. En plus, le fait que les sites de Tafchna (site I) et d'Ouiouane (site II) soient si similaires (leur corrélation moyenne est élevée) prouve que les deux chronologies

ont un signal régional commun fort. Les différences sont dues aux dissimilarités locales liées à la disposition des sites (pente, ruisseaux, feux de forêt) ou à des effets de la perturbation.

Tableau 2 : Statistiques calculées de la chronologie des cernes du cèdre à Tafechna (site I) et à Ouiuane (site II)

Caracteristiques	Site I	Site II
Longueur de la chronologie maitresse	1796-2011 (216 ans)	1776-2011 (236 ans)
Nombre des séries datées	40	22
Epaisseur moyenne (mm)	0,981	0,967
Corrélation moyenne entre toutes les carottes (Rbar)	0,345	0,363
Sensibilité moyenne	0,285	0,304
Autocorrelation	0,824	0,877
Ecart type	0,118	0,189
longueur moyenne de segment au cours des années	145,2	175
Corrélation moyenne inter arbres	0,434	0,534
Variance due à l'autoregression (%)	58,9	73,5
Rapport Signal sur Bruit (SNR)	8,099	9,435
Concordance avec la chronologie de la population	0,483	0,527
Signal Exprimé par la Population	0,968	0,962
Variance expliquée (VFE) en %	48	56,45

La valeur élevée d'autocorrélation $> 0,80$ notée dans toute la série des cèdres suggère que la croissance des années précédentes a beaucoup d'influence sur la croissance des années à venir. Ce paramètre est important car il conditionne la reconstruction des basses fréquences [24]. Etant donné que les arbres du site I sont moins âgés que ceux du site II, on s'est basé sur les carottes de ce dernier pour élaborer une reconstruction dendroclimatologique au niveau du Moyen Atlas marocain.

3.2. Analyse de la réponse climatique

Durant la présente étude, nous devons d'abord établir la saison au cours de laquelle les arbres réagissent le plus aux changements climatiques, en d'autres termes, sur quelle période les variables climatiques ont une meilleure corrélation avec les largeurs des cernes annuels. L'analyse de la corrélation cerne-climat est réalisée sur les températures mensuelles moyennes (T) et les précipitations mensuelles cumulées (P) pour les 16 mois de l'année biologique, c'est à dire de juin de l'année précédente (année t-1) ; [(P) signifie précédant la formation du cerne] à septembre de l'année en cours (année t de formation du cerne). Le tableau 3 résume le degré d'importance des différentes variables climatiques pour la croissance et la nature de corrélation cerne-climat (positive ou négative).

La distribution mensuelle des coefficients de corrélation est présentée dans la figure 2. Le coefficient Pearson est considéré comme statistiquement significatif à ($p < 0,01$ et à $p < 0,05$). Les largeurs des cernes sont positivement corrélées avec les précipitations de la saison courante de croissance allant de mai à juillet avec une corrélation significative en mois de juin (figure 2). Ce coefficient montre également une forte réponse négative de la croissance aux températures estivales (mai à août). C'est principalement parce que le déficit en eau au début de la saison de croissance supprime l'expansion rapide des trachéides et la division cellulaire dans le cambium des arbres et ainsi, l'évaporation augmente avec la progression de la température en juin-septembre, ce qui accélère le stress hydrique déjà existant. Les arbres produisent des trachéides étroites si l'eau est rare et le diamètre des trachéides contribue à des variations de densité. Ce résultat suggère que les précipitations sont moins influentes sur la croissance des arbres par rapport à la température. Même si les précipitations jouent un rôle important dans la croissance de cèdre, la température moyenne d'été est le principal facteur limitant pour la croissance des arbres. Des études antérieures réalisées au niveau du bassin méditerranéen à des altitudes similaires ont également montré que la croissance radiale est beaucoup plus corrélée avec la température que les précipitations [25].

Les températures de la fin de l'hiver (janvier et février) déterminent le début de l'activité cambiale [26]. Les gelées sévères de février expliquent ainsi les très faibles productivités des années 2006 et 2008 mais aussi des années suivantes car le cambium semble avoir été détérioré. Les précipitations de mai et parfois de juin règlent l'activité cambiale en relation avec la disponibilité en eau du sol. Un déficit important d'eau à ce moment-là peut bloquer la croissance pour l'été. Les précipitations d'août et de septembre en relation avec les températures d'août déterminent la reprise de l'activité photosynthétique à l'automne.

Les histogrammes montrent les valeurs des coefficients de Pearson entre les séries dendrochronologiques du cèdre et les variables climatiques sur une période de 16 mois.

Tableau 3 : Corrélation de Pearson entre les épaisseurs de cernes et les données climatiques sur 16 mois (juin-septembre) de 1958 à 2008

	PJui	PJuil	PAou	PSep	POct	PNov	PDec
T	-0,228	-0,247	-0,204	-0,069	-0,025	-0,111	0,097
P	-0,038	-0,200	-0,042	-0,025	-0,095	0,281	0,025

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep
T	-0,060	0,141	-0,131	-0,262	-0,406*	-0,477*	-0,355*	-0,178	0,105
P	0,126	0,196	0,277	0,106	0,281	0,345*	0,211	0,199	0,012

* coefficients de corrélation statistiquement significatifs au seuil $(p) < 0,05$ (95%)

Les populations du cèdre révèlent une pluvio-dépendance importante surtout pour le mois de juin, probablement liée aux influences méditerranéennes, avec une relation positive à des précipitations élevées en hiver et une croissance perturbée en cas d'hiver très sec et extrêmement froid [27]. Mais dans notre étude, une analyse plus détaillée des résultats où les réponses globales sont significatives ($p > 0,01$) montre que les paramètres climatiques qui interviennent significativement le plus souvent sont : les paramètres mensuels de température, toujours plus significatifs que la pluviométrie quel que soit le couple des mois examiné. Sur ce, la relation la plus forte a été observée entre la croissance des arbres et la température (mai-juillet), ainsi la variable climatique "température" a été choisi pour une démonstration de la reconstruction climatique au niveau du site étudié.

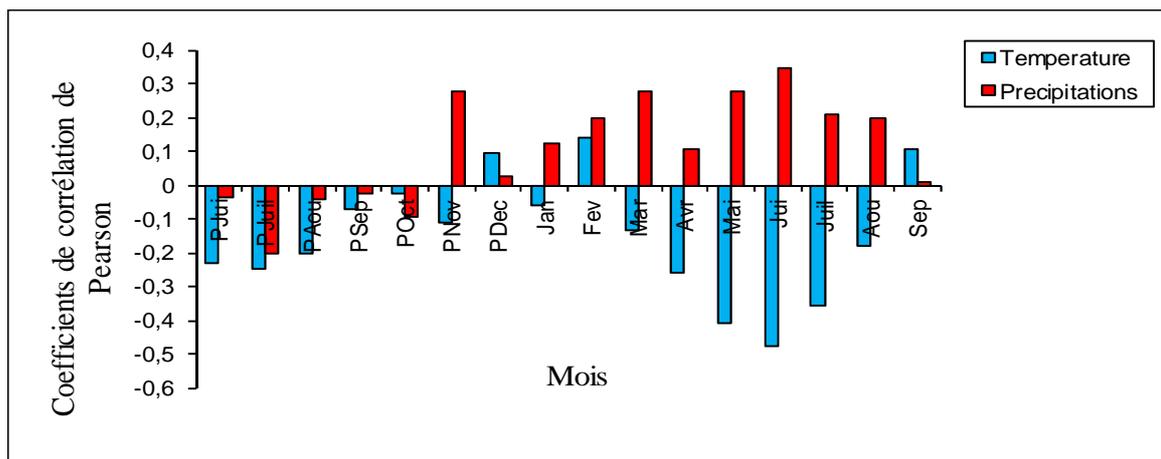


Figure 2 : Fonction de réponse de cèdre au climat

3.3. Reconstruction de température (avril-juillet)

La température moyenne de la saison de croissance allant du mois d'avril au mois de juillet a été reconstruite sur la période (1776-2008), soit 233 ans. Toutes les propriétés statistiques des 2 périodes de calibration (1958-1977) et de vérification (1978-2008) sont élevées et significatives. Les deux périodes expliquent environ 34% de la variance dans les données de température. Aussi, l'analyse de la reconstruction a montré que les températures au cours des dernières décennies ont largement dépassées les valeurs moyennes qui atteignent (14,30 °C). Les paramètres statistiques de la chronologie (tableau 4) indiquent que le cèdre dans ce site présente des valeurs modérées d'auto-corrélation, de sensibilité moyenne, de variance commune et du SNR, ce qui prouve la pertinence de la chronologie pour une bonne reconstruction climatique. Ainsi, un modèle de régression linéaire entre la croissance du cèdre et la température moyenne (avril-juillet) a été élaboré comme suit :

$$T_{\text{moyenne}} (\text{Avril-Juillet}) = -18,666 - (2,291 \times \text{Croissance des cernes})$$

La valeur de RE qui mesure la variance commune entre les données climatiques observées et celles reconstruites indique une puissance positive (supérieur à 0). Ce paramètre indique une grande capacité prédictive du modèle adopté qui donne également de bons résultats puisqu'il explique 34 % de la variance des températures sur l'ensemble des observations, ceci démontre la robustesse de notre reconstruction climatique qui sera détaillée davantage dans la section suivante.

Tableau 4 : Statistiques des résultats des tests de calibration et de vérification pour la période commune (1958-2008)

Période	r	R ²	F	DW	Période	Test Sign	Pmt	RE	CE
1958-1977	-0,55**	R ² C (0,30)	13,66	1,219	1978-2008	+21/-3**	2,69**	0,29	0,38
1978-2008	-0,57**	R ² V (0,32)	11,03	1,211	1958-1977	+20/-6**	2,76**	0,67	0,54
1958-2008	-0,58**	0,34	9,62	1,123					

** : signification at $p < 0,01$

Avec :

r : le coefficient de corrélation multiple

F : Test de Fisher

DW : Statistique de Durbin-Watson (d)

Pmt : Product mean test

3.4. Robustesse de la reconstruction

Les statistiques de calibration (R²C) et de vérification (R²V) atteignent respectivement 0,30 et 0,32. Ces coefficients très significatifs confirment la fiabilité du modèle. Ceci est habituellement testé par la vérification de la régression. La valeur de CE dans les deux périodes est également positive. Le test de signification (Test sign) qui décrit à tel point la valeur prédite suit la direction des données réelles dépasse le niveau de confiance de 99%. Aussi, la valeur R² est presque la même toute au long de la reconstruction climatique. Par conséquent, la stabilité temporelle du modèle qui implique que l'association des largeurs de cernes avec un ou plusieurs paramètres climatiques, qui a eu lieu dans le passé, continuera de s'appliquer. Cependant, le principal défaut de notre modèle est de sous-estimer les très fortes croissances et dans une moindre mesure de surestimer les très faibles croissances ; ce qui est normal dans une certaine mesure puisque seule une partie de la variance est expliquée.

Au cours de la période de vérification 1958-1877, la relation climat-cerne a été fermement soutenue avec une valeur de Pmt élevée, soit 2,69 jugée significative au niveau de 0,01. Le modèle de régression linéaire donne des résultats légèrement meilleurs au cours de la vérification mais légèrement moins bon au cours de calibration. L'ensemble de ces tests indiquent que le modèle qui sera utilisé dans la reconstruction climatique a passé les tests critiques.

La température moyenne (avril-juillet) a un effet négatif et significatif sur la croissance des arbres. Mais cette influence négative est plus probablement indirecte, plutôt que directe, car la température dans les sites montagneux ne peut pas influencer négativement la croissance des arbres. Ces résultats appuient fortement la validité de la reconstruction de la température, ce qui lui permet d'être utilisé pour évaluer l'occurrence des phénomènes climatiques au Maroc.

3.5. L'évaluation de la reconstruction

Les températures observées et reconstruites d'avril à juillet ont montré une grande similarité, sauf pendant les périodes les plus froides et les plus chaudes du 20^{ème} siècle (1966-1979, 1987-1994) et (1998-2001) lorsque la température reconstruite sur la base de la chronologie de cèdre était significativement plus élevée et respectivement inférieure aux températures enregistrées. Pour exclure la possibilité que la bonne relation entre la température et la chronologie du cèdre soit dépendante des pentes entre les carottes mesurées, le coefficient de corrélation (r) entre les séries du premier ordre observées et reconstruites a été également calculé. La valeur élevée r (0,404, $p < 0,01$) suggère une bonne relation existante entre les deux séries en haute fréquence. La comparaison des températures observées et celles reconstruites montre que les variations de hautes et moyennes fréquences sont bien reproduites par le modèle. Un net décrochement apparaît toutefois pour les années, 1986, 87, 94, 99, 2000, 2001, 2003 et 2005 chez les peuplements où la reconstruction est médiocre. Ces années-là, la température observée est très élevée alors que le modèle prévoit une température faible. La reconstruction de la température finale qui explique 34% de la variance et s'étend de l'an 1776 à 2008, est représentée graphiquement dans la figure 3. Elle couvre une durée de 233 ans avec une température moyenne inférieure de 0,5°C par rapport à la période de référence observée. L'erreur moyenne est estimée à $\pm 1,33^\circ\text{C}$.

Le présent travail de reconstruction du climat du passé (sur plus de 2 siècles) étend la température moyenne vers l'an 1776. Ainsi, la température moyenne de reconstruction était de 14,30 °C, l'écart-type (σ) était 1,45 °C. La température élevée est définie comme $>$ moyenne + 1σ (15,75 °C) et la température faible comme $<$ moyenne - 1σ (12,85 °C). Le nombre d'années à haute température (10 ans) était inférieur par rapport au nombre d'années à basse température (31 ans), il a représenté, respectivement, 4,29 % et 13,3 % dans toute la reconstruction. De 1776 à 2008, l'intervalle continu de température élevée au-dessus de 2 ans était 1804-1807, 1862-1869, 2006-

2008 dont la température de 1804 à 1807 était le plus élevé dans la reconstruction. Cependant, l'intervalle continu de température basse et supérieure à 2 ans était 1776-1790 et 1846-1855. La reconstruction de la température sur une durée de 233 ans a révélé à la fois une variation annuelle et interannuelle. En général, les basses températures et les fortes précipitations pendant le début de la saison de croissance (fin janvier-début avril) semblent conduire à une augmentation de la largeur des cernes.

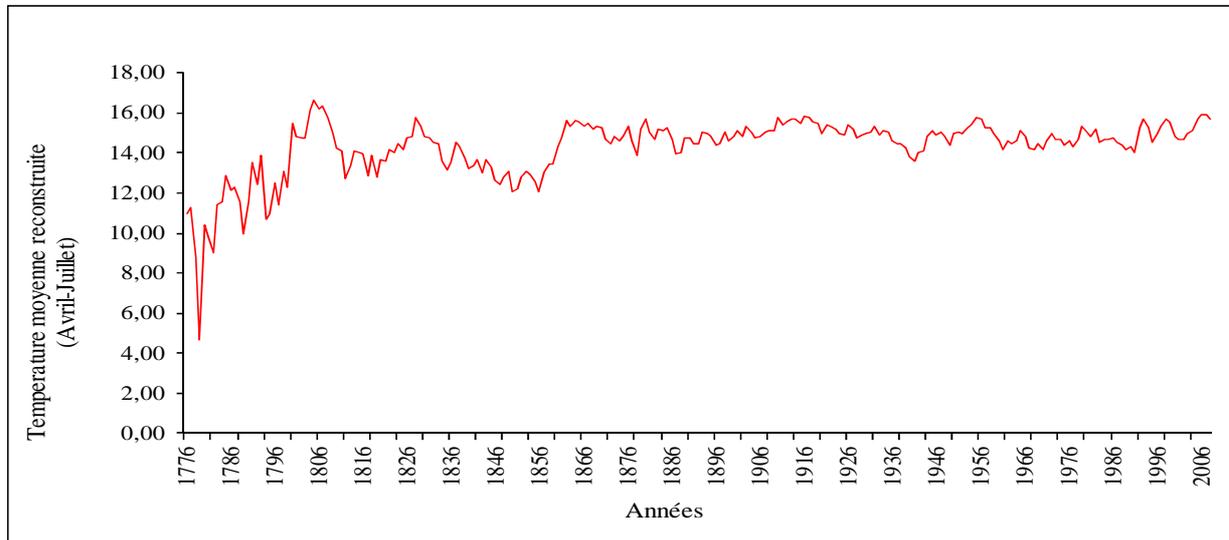


Figure 3 : Reconstruction de la température moyenne d'avril à juillet sur (1776-2008 AD)

3.6. Relation croissance -climat

Des études antérieures ont révélé que les périodes critiques pour la croissance radiale de *Cedrus atlantica* M. dans le bassin méditerranéen sont principalement de mai à août, basée à la fois sur l'analyse anatomique des cernes des arbres [28,29] et les investigations dendroclimatologiques [30]. Ce constat est en parfaite accord avec nos résultats de modélisation qui démontrent que l'impact des températures de juin à juillet est décisif sur le degré de la croissance des cernes. Avec l'augmentation rapide de la température de l'air du printemps à l'été, l'émergence du feuillage conduit à la consommation de grandes quantités d'eau, en même temps, la température élevée cause un stress hydrique accentué par l'évaporation du sol et la transpiration des arbres, ce qui peut conduire à une relation négative entre les cernes indicés et la température. Cette réponse au climat pourrait être attribuable à la baisse du taux net de photosynthèse, probablement en raison de la hausse d'évapotranspiration.

Notamment, pendant les mois d'été, les précipitations sont inférieures, mais la température est à son maximum dans la région du Moyen Atlas. D'autre part, la température du mois de mars a montré son effet significatif sur la croissance de cèdre, car elle favorise l'ouverture des bourgeons foliaires dormants et aussi l'initiation de l'activité cambiale.

Dans les régions semi-arides, les arbres sont généralement sensibles à l'humidité, en particulier avant et pendant la saison de croissance [31]. Par conséquent, même si une légère augmentation des précipitations pourrait être particulièrement bénéfique à la production photosynthétique plus tard et la croissance cambiale, la corrélation positive entre les épaisseurs de cernes et les précipitations est statistiquement significative pour le mois de juin. La présente étude a montré l'effet des conditions climatiques de la saison précédant la croissance des cernes du cèdre, ceci est similaire aux autres résultats de recherches mettant en évidence l'importance des facteurs environnementaux de l'année qui précède l'accroissement en épaisseur [32,33].

Par ailleurs, l'influence positive des précipitations de l'automne qui précèdent la croissance annuelle (tableau 3), peut s'expliquer par le rôle important des chutes d'eau automnales pour la reconstitution du stock d'eau dans le sol. Celles-ci peuvent aussi avoir une influence sur la restauration du système racinaire et, donc participer à l'augmentation du potentiel d'absorption permettant une bonne mise en réserve des substances nutritives jusqu'au déclenchement de l'activité cambiale.

Les résultats des statistiques de calibration et de vérification du *Cedrus atlantica* M. ($r=0,34$) sont comparables (supérieures) à ceux trouvés par [34] dans le Québec Occidental. Le sol du site dendrochronologique d'Ouiouane est calcaro-dolomitique. Dans ce type de sol, le drainage et l'aération sont élevés, ce qui est essentiel pour une bonne croissance des racines. L'aération aide les organismes du sol à survivre. Ces organismes contribuent souvent en mettant les nutriments à la disposition pour les plantes. Cet ensemble de données montre le plus grand potentiel dudit site pour le développement d'une reconstruction via l'usage d'une température moyenne allant de mois d'avril au mois de juillet.

L'influence négative de la température moyenne étudiée précédemment sur la croissance de *Cedrus atlantica* M. est raisonnable dans la zone où la température estivale dépasse 20°C, par exemple, dans la zone méditerranéenne, surtout à des altitudes moyennement élevées, où notre site est localisé (1722 m). La relation positive existante entre la croissance des arbres et les précipitations depuis le mois de novembre de l'année précédente au mois de septembre de l'année en cours suggère que les précipitations jouent un rôle clé dans la croissance de cèdre.

Dans la zone d'étude, au cours des mois de décembre et janvier, les faibles précipitations pourraient favoriser la respiration au cours de la photosynthèse étant donné que les arbres restent sans feuilles et la photosynthèse est presque nulle à ce moment-là, cela pourrait être la cause de la faible croissance des arbres. La relation inverse avec les précipitations du mois de juin pourrait être attribuable à la baisse du taux net de photosynthèse nette, ce qui aurait pu résulter de taux plus élevés d'évapotranspiration.

Dans les 100 dernières années, la température de la terre a montré deux importantes périodes chaudes en 1910 et 1945 [35]. Dans le site étudié, la température moyenne (avril-juillet) dans ces deux périodes a montré une valeur élevée qui coïncidait avec celle constatée ailleurs au niveau du globe. À partir de l'année 1910 jusqu'à 1919 et (2004-2008), les épaisseurs de cerne commencent à devenir de plus en plus étroites, cela peut être due à une réponse aux conditions de froid ou de sécheresse extrêmes à cause des anomalies du glacier de la mer liées à l'influence positive de l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA). Cependant, la tendance de la croissance radiale du cèdre dans le site échantillonné est pratiquement stable durant la période 1906-1922 malgré l'augmentation observée de la température d'environ 1.11 °C par rapport à la moyenne. Cette tendance a été également remarquée dans d'autres études [36]. La sensibilité climatique du cèdre d'Ouiouane (0,304) est spécifique à ce site et indique une forte dépendance avec la proximité de la Mer Atlantique. Cependant, des années citées comme chaudes et sèches dans la littérature telles que 1781 [37] apparaissent froides dans notre reconstruction avec une moyenne de 9,79 °C. La douceur climatique de la fin du XVIII^{ème} siècle semble par contre spécifique des cédraines du Moyen Atlas marocain et plus généralement au Maroc. Elle est également reconstruite dans les Pyrénées [38] et sur toute l'aire méditerranéenne occidentale [39]. Les résultats de notre étude ont montré l'importance des températures printanières et estivales sur la croissance radiale du cèdre dans l'ensemble des cèdres d'Ouiouane.

Conclusion

De nombreuses études ont été consacrées aux suivis de l'impact du climat sur les écosystèmes naturels en particulier forestiers en Afrique et au Maghreb. Cependant, peu sont suffisamment intéressées à l'étude de l'utilité des cernes d'arbres dans la reconstruction du climat du passé récent. Au Maroc, d'une façon générale, il existe très peu de données disponibles sur la dendroclimatologie des espèces forestières naturelles telle que le cèdre de l'Atlas.

De ce fait, il nous a paru nécessaire de conduire une étude dendroclimatique dans les cédraines de la province de Khenifra au Moyen Atlas marocain. Le présent travail vise à mettre en exergue le potentiel dendroclimatologique des cèdres de deux sites forestiers Tafelna et Ouiouane. Les deux localités présentent un bon signal climatique prouvé par leur sensibilité moyenne élevée. Cependant, vu que les arbres d'Ouiouane possèdent les plus longues chronologies, ils ont été utilisés pour la reconstitution de 233 ans de température moyenne (avril-juillet) depuis 1776 et cela en se basant sur un modèle de régression linéaire. Les opérations de calibration et de vérification affirment la stabilité et la fiabilité du modèle utilisé.

Les résultats obtenus montrent que la reconstruction a expliqué 34% de température (avril-juillet) durant la période 1776-2008. On constate également que la reconstruction de température dans les montagnes du Moyen Atlas peut représenter une variabilité régionale du climat, ainsi on dénote une période froide plus longue (1776-1790 AD), une autre période moyennement froide (1846-1855 AD) et trois périodes chaudes (1804-1807 AD., 1862-1869 AD et 2006-2008 AD). Une comparaison avec des travaux antérieurs nous a permis de constater une forte ressemblance entre nos résultats et ceux obtenus dans quelques régions du monde en particulier dans celles du bassin méditerranéen.

Les données des chronologies de cernes des arbres qui remontent à 1776 AD sont insuffisantes pour une longue reconstruction climatique. En revanche, un futur échantillonnage intensif d'arbres âgés du cèdre sur le terrain et leur analyse peut prolonger lesdites chronologies. Ceci permettra de mieux comprendre la variabilité de sécheresse et de pluviométrie dans et autour du Maroc.

Remerciements

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'une thèse doctorale en coopération avec le Centre de Recherche Forestière (CRF) de Rabat et la Faculté des Sciences de Rabat, Maroc.

Références

1. Kaennel M., Schweingruber F.H. Multilingual glossary of Dendrochronology: Terms and definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. Paul Haupt Publishers, (1995) 467 p.
2. Munaut A.V., Serre-Bachet F. The mediterranean area in «*Climate from tree rings*». Proceedings of the Second International Workshop on global dendroclimatology, Norwich, Cambridge University Press, London, (1982) 151.

3. Stockton C.W. Current research progress towards understanding drought. Proceeding of Drought, water management and food production, Agadir, Morocco, (1988) 21-35.
4. Raouane M. Étude dendroclimatologique du chêne zéen (*Q. canariensis* Willd) du Rif Occidental et du Moyen-Atlas au Maroc. Thèse de doctorat de troisième cycle, Faculté de Saint-Jérôme, Marseille, (1985) 125 p.
5. Till C. Recherches dendrochronologiques sur le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) au Maroc. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, (1985) 170p.
6. Chbouki N. Spatio-temporal characteristics of drought as inferred from tree ring data in Morocco. PhD Thesis, University of Arizona, Tucson (1992) 243 p.
7. Mokrim A. *Ann. Rech. For. Maroc* 41 (2009) 48-68.
8. Bohórquez J. Estructura y dinámica de masas de *Cedrus atlantica* M. en el Medio Atlas (Ifrane, Marruecos), (2010) 61 p.
9. Nefaoui M. Dendroécologie, productivité et dynamique de la croissance radiale du pin maritime naturel au Maroc. Thèse de doctorat, Université de Aix-Marseille III, (1996) 299 p.
10. Bertaudière V. Dendroécologie du Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) dans la haute montagne méditerranéenne (Haut Atlas, Maroc) et dans une station xéothermique des Pyrénées centrales (France). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, (1999) 234 p.
11. Benabid A., *Ann. Rech. For. Maroc* T (27) (1994) 61-76.
12. MATEE, Quatrième Rapport National sur la Biodiversité. Département de l'Environnement au Maroc (2009) 112 p.
13. Merian P. Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées : Quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage, Thèse de doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), (2012) 454 p.
14. RINNTECH, User reference TSAP-Win : Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications, (2003) 99 p.
15. Grissino-Mayer H.D., *Tree-ring Research* 57(2) (2001) 205-221.
16. Cook E.R., Holmes, R.L. Program ARSTAN User's Manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson (1986) 51 p.
17. Tessier L. *New Phytologist* 111(3) (1989) 517-529.
18. Belingard C. Étude dendroécologique de la limite supérieure de la forêt dans les Alpes du sud en relation avec les facteurs climatiques et anthropiques. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille III, (1996) 103 p.
19. Fritts H.C. Tree rings and climate. London, New-York, San Francisco, Eds Academic Press, (1976) 567 p.
20. Briffa K., Jones P. Basic chronology statistics and assessment: *Methods of Dendrochronology : Applications in the Environmental Sciences*, Kluwer Academic, Dordrecht, (1990) 137-152.
21. Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D., *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 (1984) 201-213.
22. Cook E.R., Meko D.M., Stahle D.W., Cleaveland M.K., *J. Climate*, 12 (1999) 1145-1162.
23. Fritts H.C., Reconstructing Large-Scale Climate Patterns from Tree-Ring Data, University of Arizona Press, (1991) 286 p.
24. Cook E.R., Briffa K.R., Meko D.M., Graybill D.A., Funkhouser G., *The Holocene* 5(2) (1995) 229-237.
25. Liu X., Qin D., Shao X., Chen T., Ren J., *Science in China Series D: Earth Sciences* 48 (2005) 521-529.
26. Poirier M. Etude écophysiological de l'endurcissement au gel des arbres : Impact des conditions estivales de croissance sur la résistance au gel des arbres, Thèse doctorat, Université Blaise Pascal, (2008) 316 p.
27. Chbouki N., Stockton C.W., Myers D. E., *International Journal of Climatology* 15 (1995) 187-205.
28. Guan W., Xiong W., Wang Y.H., Yu P.T., He C.Q., Du A.P., Liu H.L., *Scientia Silvae Sinica* 43 (9) (2007) 1-6.
29. Liang J., Yang S., Hu Z.Z., Huang B., Kumar A., Zhang Z., *Climate Dynamics* 32 (2009) 989-1001.
30. Cai Q.F., Liu Y., Bao G., Lei Y., Sun B., *Chinese Science Bulletin* 55(26) (2010) 3008-3014.
31. Cai Q.F., Liu Y., *Journal of Geographical Sciences* 17(3) (2007) 293-303.
32. Oberhuber W., Kofler W., Pfeifer K., Seeber A., Gruber A., *Trees* 22 (2008) 31-40.
33. Pfeifer K., Kofler W., Oberhuber W., *Veg Hist Archaeobot* 14 (2005) 211-220.
34. Tardif J., Brisson J., Bergeron Y., *Canadian Journal of Forest Research* 31(2001) 1491-1501.
35. Walther G.R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F., *Nature* 416 (2002) 389-395.
36. Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A., *Nature* 391(1998) 678-682.
37. Casty C., Handorf D., Sempf M., *Geophys. Res. Lett* 32 (2005) L13801.
38. Büntgen U., Frank D.C., Grudd H., Esper J., *Climate Dynamics* 31 (2008) 615-631.
39. Nicault A., Alleaume S., Carrer M., Nola P., *Climate dynamics* 31 (2008) 227-245.