

Étude préliminaire des effets de l'Oscillation Nord Atlantique d'hiver sur les cernes du cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière, au Maroc

Preliminary study of winter North Atlantic Oscillation on Atlas Cedar Tree Rings in Morocco

Rachid ILMEN^{*1}, Hassan BENJELLOUN², Lahcen OUAHMANE³,
Mounir HAKKOU⁴, & Morad BENGHAZI⁵

1. Département Hydraulique, Environnement et Climat (HEC), Ecole Hassania des Travaux Publics (EHTP) Km 7, Route d'El Jadida, BP. 8108- Casablanca- Maroc *(ilmenrachid@gmail.com).
2. Département du Sol, Eau et Biodiversité, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, BP. 511, Tabriquet-Salé, Morocco.
3. Laboratoire d'Ecologie et Environnement, Faculté des Sciences Semailia, Université Caddi Ayyad, Marrakech, Avenue Moulay Abdellah BP 2390, 46000, Marrakech, Maroc.
4. Département des Sciences de la terre, Institut scientifique, Université Mohamed V, Avenue Ibn Batouta, B.P 703, 10106 Rabat, Maroc.
5. Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification, B.P : 605 Rabat-Chellah, Maroc.

Résumé. L'étude des effets de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) sur la croissance des cernes du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) a été menée au niveau de quatre sites forestiers au Maroc. Au niveau de chaque site, un prélèvement de 40 carottes a été conduit en 2011. L'objectif est de mesurer les épaisseurs des cernes pour déterminer les chronologies moyennes des anneaux de croissance. Les résultats révèlent une amplitude variable d'un site à l'autre. Durant la période 1825-2000, les épaisseurs des cernes montrent des valeurs plus élevées dans les sites I et II comparativement aux sites III et IV. Cela est probablement dû à la différence des chronologies entre les sites. Les conditions écologiques locales sont d'une importance certaine dans l'explication de la variation des épaisseurs de cernes quand on s'éloigne de l'endroit de mesure de l'indice de l'ONA. En limitant l'analyse des corrélations à la période 1900-2000, les corrélations entre les cernes et l'indice ONA deviennent plus grandes et significatives ($p < 0,05$) particulièrement au niveau des arbres des sites I, II et IV comparativement à la période 1825-2000. L'étude a montré que l'ONA exerce une grande influence sur les précipitations hivernales marocaines qui lui sont négativement corrélées. Par ailleurs, des signes de l'ONA dans la variation pluriannuelle de la croissance des cernes ont été détectés chez les cèdres des quatre sites étudiés.

Mots-clés : Oscillation Nord Atlantique, cernes, cèdre, précipitations, Maroc.

Abstract. The study of effects related to the North Atlantic Oscillation (NAO) on the growth rings in the Atlas cedar (*Cedrus atlantica* (Endl.) was conducted at four forest sites. A sampling of 40 tree cores per site was done and followed by a preparation of these samples and then by a measuring of tree ring widths. The mean chronologies of growth rings show variable amplitude from one site to another. During the period 1825-2000, the tree ring widths indicate higher values in Sites I and II compared to Sites III and IV. This is probably due to the difference between the chronologies among Sites. The local ecological conditions are of some importance in explaining the variation of tree ring widths when sites are far away from the site where measurement of NAO index was done. By limiting the analysis of correlations to the period 1900-2000, the correlations between tree rings and ONA indices become larger and significant ($p < 0.05$), especially for trees of sites I, II and IV compared with the period 1825-2000. The study showed that the NAO has a great influence on Moroccan winter precipitations which are negatively correlated to it. Furthermore, NAO signs in multi-year variation of ring growth were detected in cedar trees of the four studied sites.

Keywords : Atlantic North Oscillation, tree rings, cedar, rainfall, Morocco

INTRODUCTION

The North Atlantic Oscillation (NAO) is a climatic phenomenon of large scale which defines the climate of much of the Northern Hemisphere. Since its influence is mainly in winter, NAO is the dynamic balance between the Icelandic Low and the Azores High (Weyhenmeyer *et al.* 2004).

During the positive phase of the NAO: there is a widening of the Icelandic Low and intensification of the Azores anticyclone. The predominance of such a phase on the three last decades has contributed significantly to the observed climate warming in Europe and the chronic drought in southern Europe and in southern Mediterranean

basin. Precipitations are then reduced on Morocco and thus natural resources in particular forest ecosystems are increasingly threatened. Conversely, the negative phase corresponds to a weakening of southern pressure gradient in the North Atlantic. During this phase, the intensity of westerly winds decreases and the Atlantic perturbations migrate to south of Europe and to the Mediterranean basin. This phase is thus in favor of rainfall in Morocco.

The present work studies the effects of NAO on cedar tree rings growth in the Moroccan Atlas Mountains. The desired goal is to study correlations between the NAO Winter index and evolution of rings widths in the Middle and High Atlas of Morocco will be highlighted.

MATERIAL & METHODS

Sampling sites

The choice of sites subject to the dendroclimatological study focused on maximum diversification of the physical and ecological conditions to monitor the impact of these factors on the results. The geographical, ecological and characteristics of cores extracted from cedar trees in four studied sites (I, II, III and IV) located in the Middle and High Atlas are described in Table 1.

Experimental procedure

The wood cores were taken at a height of 1.3 m above ground. The coring was done on 20 trees, with two cores per tree at each site. The cores extracted from trees are dried at an ambient temperature in the laboratory. Then, the samples were mounted, glued and are identified by a code composed of the name of the species, its provenance, the tree number and that of the core. Later, trees rings widths measurements were done. A chronology of each individual tree is developed then a master chronology is built for each site (Ilmen *et al.* 2014).

The North Atlantic Oscillation Winter index

The NAO index was calculated by the difference in pressure at the surface of the sea averaged on a winter between Lisbon in Portugal and Stykkisholmur/ Reykjavik in Iceland (Ilmen 2014, Hurrell 1995).

This parameter which provides a record of the winter climate variability (December-March) from 1825 to 2000 will be used in this scientific research to identify the NAO signal in cedar tree rings at the four sites studied (Taolat, Ain Kahla, Bikrit and Col du Zad).

RESULTS

Chronology of rings thicknesses at the four studied sites

Climate character in relation to the different altitudes slopes and remoteness from the Atlantic Ocean have generated different cedar chronologies in the four sites. The mean tree ring widths show variability between sites, it is

1.05 mm at Site I (Fig. 2) 1.69 mm at Site II (Fig. 4), 0.66 mm at the Site III (Fig. 5) and 0.61 mm at site IV. The general appearance of mean chronologies reveals variable amplitude from one site to another (Fig. 3).

The variability between sites affects both chronologies expressed by tree rings widths and extreme values of these widths.

Correlation between the NAO winter index and ring width (1825-2000)

The positive phase of the NAO is reflected in Morocco by lower rainfall and more droughts. However, its negative phase expresses climatic disturbances in favor of rainy periods. Correlations between the NAO winter index and the evolution of measured widths in the four sites show successions of winters in positive or negative mode without any clearly marked trend (Fig. 6). The highest values of the NAO index indicate more severe climatic conditions and unfavorable to the tree ring growth.

DISCUSSION

We demonstrated that the variation of ring widths of medium frequencies, embodying the minimum of growth curves, is influenced by the NAO winter index in the studied sites. The best correlation was detected during the second half of the 20th century (1950-2000). These results are also consistent with findings showing a trend to the climate change in Morocco, in the 21st century to warmer and drier conditions.

CONCLUSION

Preliminary results of this study allow us to confirm that the cedar chronologies developed contain a significant signal of NAO: reducing of ring widths since the second half of the 20th century in the four sites is attributed to the influence of NAO which generates a rainfall reduction in Morocco.

In this study, despite the low correlations between cedars growth and NAO winter index, the interest is to show the existence of climate signals in cedar tree rings.

INTRODUCTION

L'Oscillation Nord Atlantique (ONA) est un phénomène climatique de grande échelle qui définit le climat d'une grande partie de l'hémisphère Nord. Étant donné que son influence s'exerce principalement en saison hivernale, des études ont cherché à savoir si l'ONA influait sur le moment du dégel des lacs de l'hémisphère Nord et ont révélé des résultats variables selon les lacs. Néanmoins, une forte tendance à la baisse dans le temps de dégel à partir de 1995 a été trouvée pour toutes les régions. En Suède et en Finlande, on observe une forte corrélation entre la diminution de la latitude et la précocité du dégel après le mois de janvier. Il s'est alors avéré que la zone d'effet de l'ONA s'était décalée au cours des 130 dernières années. Son activité se fait aujourd'hui sentir jusqu'en Sibérie, mais elle touche moins l'Amérique du Nord. L'ONA est l'équilibre dynamique entre la dépression d'Islande et l'Anticyclone des Açores affecté par une oscillation

intrinsèque à l'atmosphère qui gouverne le régime de vents d'Ouest au-dessus de l'Europe et de l'Est de l'Océan Atlantique (Weyhenmeyer *et al.* 2004).

Durant la phase positive de l'ONA : il se produit un creusement de la dépression d'Islande et une intensification de l'anticyclone des Açores. Le renforcement du gradient de pression méridionale contribue à l'intensification de la circulation des vents d'Ouest sur le Nord-Est Atlantique et le continent Européen. La prédominance d'une telle phase sur les trois dernières décennies a fortement contribué au réchauffement du climat observé en Europe et à la sécheresse chronique sur l'Europe du Sud et le Sud du bassin méditerranéen avec d'importantes conséquences en termes de réserves en eau. À l'inverse, la phase négative correspond à un affaiblissement du gradient de pression méridionale dans l'Atlantique Nord (Driouech 2010). Durant la phase positive de l'ONA, les dépressions orientées Sud-Ouest et Nord-Est migrant vers le Nord, poussent les perturbations se formant au-dessus de l'Atlantique vers le Nord-Ouest du

continent européen qui bénéficie de conditions humides et douces (Wanner & Beniston 1995). Les précipitations se trouvent alors réduites sur le Maroc et par conséquent, les ressources naturelles sont de plus en plus menacées notamment les écosystèmes forestiers. A l'inverse, durant la phase négative de l'ONA, l'intensité des vents d'Ouest diminue et des perturbations atlantiques migrent vers le Sud de l'Europe et le bassin méditerranéen. Cette phase se trouve ainsi en faveur des précipitations au Maroc. D'autre part, plusieurs études antérieures ont montré l'influence des modes de la circulation extratropicale sur la variabilité interannuelle des précipitations au Maroc, notamment celle réalisée par Driouech (2010). Les précipitations qui tombent sur les montagnes diminuent lors de la phase positive de l'ONA. La récurrence de conditions sèches sur la zone méditerranéenne depuis le début des années 1980 a été attribuée à la persistance de la phase positive de l'ONA (Lamb & Pepler 1987, Xoplaki *et al.* 2004). Ce phénomène, observé durant les vingt dernières années du XXème siècle, peut être modélisé en faisant intervenir une diminution de la température de surface de l'Océan Atlantique tropical, ce qui souligne l'importance des connexions tropiques-latitudes tempérées (Cassou *et al.* 2004). Au Maroc, la sécheresse dans les régions montagneuses est souvent ignorée et les canicules de la décennie quatre-vingts du siècle dernier nous rappellent que ces zones ne sont pas épargnées par des déficits en eau importants, notamment pendant la saison estivale. Néanmoins, au Maroc l'influence de l'ONA sur la pluviométrie se trouve affaiblie vers l'intérieur du pays par la barrière de l'Atlas. Cet impact est principalement limité aux régions situées à l'Ouest de cette chaîne montagneuse.

Le présent travail étudie les effets de l'ONA sur la croissance des cernes chez le cèdre (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) des chaînes de l'Atlas du Maroc. La finalité recherchée est d'étudier des corrélations entre l'indice de l'ONA d'hiver et l'évolution des épaisseurs des cernes le Moyen Atlas et le Haut Atlas. Il est à signaler que la pluviométrie marocaine, particulièrement celle des Montagnes de l'Atlas se caractérise par une forte variabilité inter- et intra-annuelle.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Le cèdre de l'Atlas au Maroc

Sur l'ensemble de leur aire naturelle au Maroc, les cédraies s'observent entre 1500 et 2600 m d'altitude (Benabid 1982). Cette zone correspond aux étages de végétation du supra-méditerranéen qui s'étalent entre 1400 et 1800 m dans le Rif; entre 1600 et 2000 m dans le Moyen Atlas et entre 1700 et 2100 m dans le Haut Atlas Oriental marocain.

Le potentiel dendrochronologique du cèdre est incontestable par rapport aux autres espèces forestières marocaines telles que les chênes, les pins et les cyprès grâce à la bonne visibilité de ses cernes. Le cèdre est vénéré depuis la plus haute antiquité, non seulement pour son utilisation, mais aussi pour sa vigueur et sa longévité, il est considéré

comme un symbole de majesté et de force. C'est un gardien de la mémoire du temps et de l'espace forestier au Maroc, car étant une espèce située à la limite altitudinale supérieure de la forêt, il est susceptible de réagir fortement aux modifications des températures. Grâce à sa longévité, qui peut atteindre plusieurs siècles, et aussi la résistance de son bois à la pourriture, le cèdre de l'Atlas constitue un arbre très utile pour les recherches étudiant les relations entre la croissance et le climat.

Choix des sites à échantillonner

Le choix des sites faisant l'objet de l'étude dendroclimatologique a porté sur une diversification maximale des conditions physiques et écologiques afin de contrôler l'impact de ces facteurs sur les résultats obtenus. Les caractéristiques géographique, écologique et dendrométrique des carottes des 4 sites étudiés I, II, III et IV (Fig. 1) sis dans le Moyen et le Haut Atlas sont décrites dans le tableau 1.

Procédure expérimentale

Les carottes du bois ont été prélevées à une hauteur de 1,3 m du sol. Le carottage a été fait sur 20 arbres, à raison de deux carottes par arbre au niveau de chaque site. La représentativité de la chronologie moyenne repose sur le nombre de séries individuelles ayant servi à sa construction. Les carottes extraites des arbres sont séchées à une température ambiante au laboratoire. Ensuite, les échantillons sont montés et collés sur des porte-carottes qui sont identifiés à l'aide d'un code composé du nom de l'espèce, de sa provenance, du numéro de l'arbre et celui de la carotte. Par la suite, on fait un ponçage motorisé des carottes suivi d'un ponçage de finition manuel à l'aide d'un papier abrasif pour obtenir une surface lisse et continue.

Les mesures d'épaisseur des cernes ont été effectuées au Laboratoire de la Technologie des Produits Forestiers de l'École Nationale Forestière des Ingénieurs (ENFI), Rabat-Salé. La distance séparant le bord du dernier cerne mesuré et le cœur présumé est calculée : il s'agit d'estimer l'âge de l'arbre lorsque la carotte ne passe pas par le cœur. Cette distance est convertie en nombre de cernes en divisant cette longueur par la largeur moyenne des cinq derniers cernes mesurés (généralement 5) (Lebourgeois & Mérian 2012). Une chronologie individuelle de chaque arbre est élaborée puis une chronologie maîtresse est construite pour chaque site (Ilmen *et al.* 2014).

L'indice d'Oscillation Nord Atlantique d'Hiver

L'indice de l'ONA est calculé par la différence de pression à la surface de la mer moyennée sur un hiver entre Lisbonne au Portugal et Stykkishólmur/Reykjavik en Islande (Ilmen 2014, Hurrell 1995). Ce paramètre qui fournit un enregistrement de la variabilité climatique hivernale (Décembre-Mars) de 1825 à 2000 est exploité dans le présent article pour déceler le signal de l'ONA dans les cernes du cèdre au niveau des quatre sites étudiés (Taoalt, Ain Kahla, Bikrit, Col du Zad).

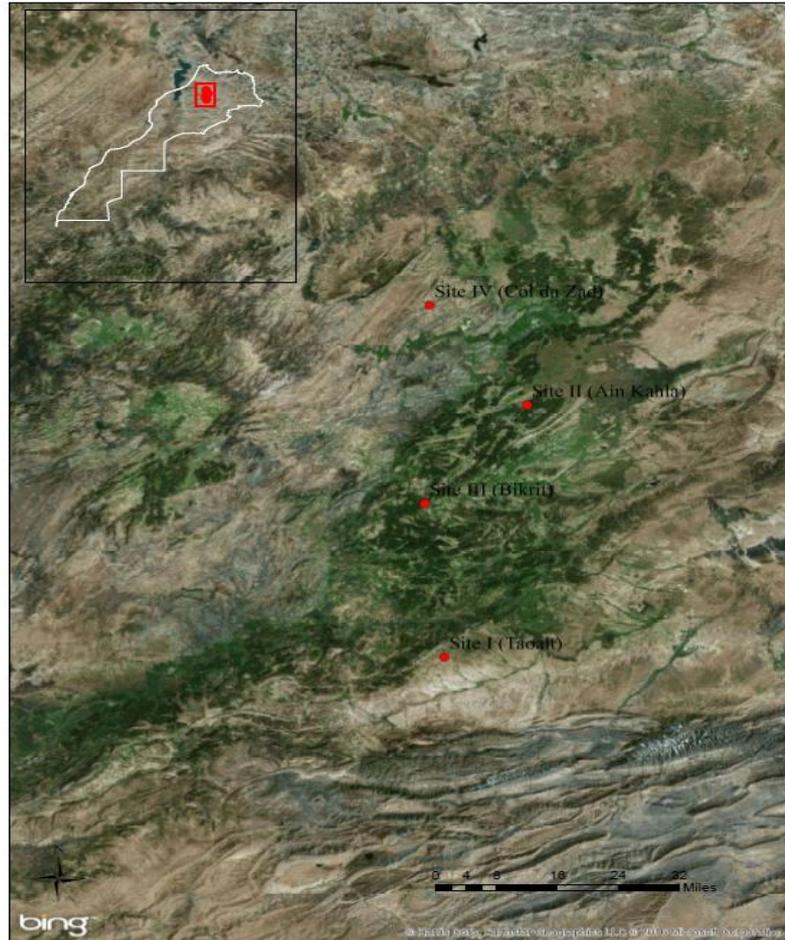


Figure 1. Localisation géographique des sites échantillonnés.
 Figure 1. Geographic location of sample sites.

Tableau 1. Comparaison des caractéristiques écologiques et dendrométriques des quatre sites étudiés (Taoalt, Ain Kahla, Bikrit, Col du Zad).
 Table 1. Comparison of the ecological and dendrometric characteristics of the four sites studied (Taoalt, Ain Kahla, Bikrit, Zad).

Caractéristiques	Site I (Taoalt)	Site II (Ain Kahla)	Site III (Bikrit)	Site IV (Col du Zad)
Age (ans)	514	349	644	878
Altitude (m)	2100	1900	2078	2000
Pente (°)	35	40	45	55
Exposition	Nord Ouest	Sud Ouest	Sud Est	Sud Est
Latitude (N)/ Longitude (W)	32°27,805'/ 5°19,293'	33°15, 090'/ 5°14,027'	33°01,031'/ 5°14,729'	33°02,008'/ 5°06,003'
Nombre d'arbres échantillonnés	20	20	20	20
Nombre de carottes	40	40	40	40
Roche mère	Schisteux marno- calcaire	Calcaires dolomitiques	Basalte	Calcaire
Impact humain	Modéré	Modéré	Très fort	Faible
Distance approximative de l'Océan Atlantique (km)	220	170	190	205
Bioclimat	Subhumide	Subhumide	Subhumide	Subhumide

RÉSULTATS

Chronologie des épaisseurs des cernes au niveau des quatre sites étudiés

Les caractères climatiques, en relation avec les altitudes différentes, les diverses expositions et l'éloignement de

l'Océan Atlantique ont engendré des croissances annuelles variables dans les quatre sites. L'épaisseur moyenne des cernes montre des différences entre les sites, elle est de 1,05 mm dans le Site I (Fig. 2), de 1,69 mm pour le II, de 0,66 mm dans le III et de 0,61 mm au Site IV.



Figure 2. Vue de la cédraie de Taoalt dans le Haut Atlas Oriental (Photo Ilmen 2013).

Figure 2. View of the cedar forest of Taoalt in the Oriental High Atlas (Photo Ilmen 2013).

L'allure générale des chronologies moyennes révèle une amplitude variable d'un site à l'autre (Fig. 3). Elle est relativement plus grande pour le Site II [0,22-6,04 mm] comparativement aux autres sites : Site I [0,07-2,04 mm], Site II [0,42-4,04 mm] et Site IV [0,13-1,60 mm]. Une croissance radiale assez irrégulière dans le secteur du Site I (durant la période 1663-2011) est reconnue, chose qui peut être expliquée d'une part par l'âge du peuplement (plus jeune : 349 ans), les conditions écologiques notamment l'altitude relativement plus faible : 1900m et sa plus faible continentalité (éloignement de l'Océan Atlantique : 170 km) comparativement aux autres sites et d'autre part par la nature du substrat (calcaire dolomitique) plus filtrant par rapport aux basaltes, calcaires et schistes marno-calcaires où la rétention de l'eau permet un accroissement plus régulier dans les autres sites.

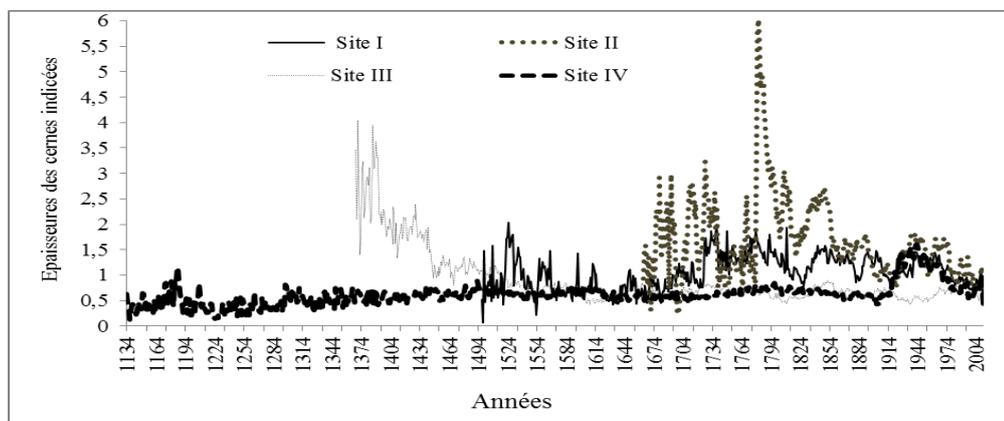


Figure 3. Variation des épaisseurs des cernes avec la chronologie du cèdre de l'Atlas dans les quatre sites étudiés.

Figure 3. Variation of tree ring widths with the chronology of the Atlas cedar in the four studied sites.

La variabilité entre les sites affecte à la fois les chronologies exprimées par les épaisseurs des cernes et les valeurs extrêmes de ces épaisseurs. Le site II (Fig. 4) qui a la chronologie la plus courte montre le pic des épaisseurs de cernes le plus élevé (6,04 mm) suivi par ceux du Site III (4,04 mm), Site I (2,04 mm) et du Site IV (1,60 mm). Les valeurs minimales des épaisseurs des cernes enregistrées sont de 0,07 mm (Site I en 1499), 0,13 mm (Site IV en 1137), 0,22 mm (Site II en 1698) et de 0,42 mm (Site III en 1936). Ces maxima et minima observés ne sont généralement pas synchrones entre les sites étudiés. Les chronologies montrent également des différences (Tab. 1). À partir de la seconde moitié du 16^{ème} siècle jusqu'au début du 20^{ème} siècle, les sites III et IV montrent une certaine synchronisation dans l'évolution des épaisseurs des cernes et des amplitudes plus faibles par rapport aux autres sites (I & II). Etant donné que les valeurs connues de l'indice de l'ONA d'hiver s'étendent de l'an 1825 à l'an 2000, les corrélations des épaisseurs des cernes avec cet indice seront limitées seulement à cette période pour les quatre sites.

Corrélation entre l'indice ONA d'hiver et la largeur des cernes (1825-2000)

La phase positive de l'ONA se traduit au niveau du Maroc par des précipitations moindres et plus de sécheresse. Par contre, sa phase négative exprime des perturbations clima-

tiques en faveur de périodes pluvieuses. La phase positive de l'ONA se traduit au niveau du Maroc par des précipitations moindres et plus de sécheresse. Par contre, sa phase négative exprime des perturbations climatiques en faveur de périodes pluvieuses. Les corrélations entre l'indice de l'ONA d'hiver et l'évolution des épaisseurs mesurées chez le cèdre dans les quatre sites étudiés : Site I dans le Haut Atlas Oriental ainsi que les sites II et III (Fig. 5) et IV (Fig. 7) du Moyen Atlas (Fig. 6).



Figure 4. Vue de la cédraie d'Ain Kahla dans le Moyen Atlas (Photo Ilmen 2013).

Figure 4. View of the cedar forest of Ain Kahla in the Middle Atlas. (Photo Ilmen 2013).

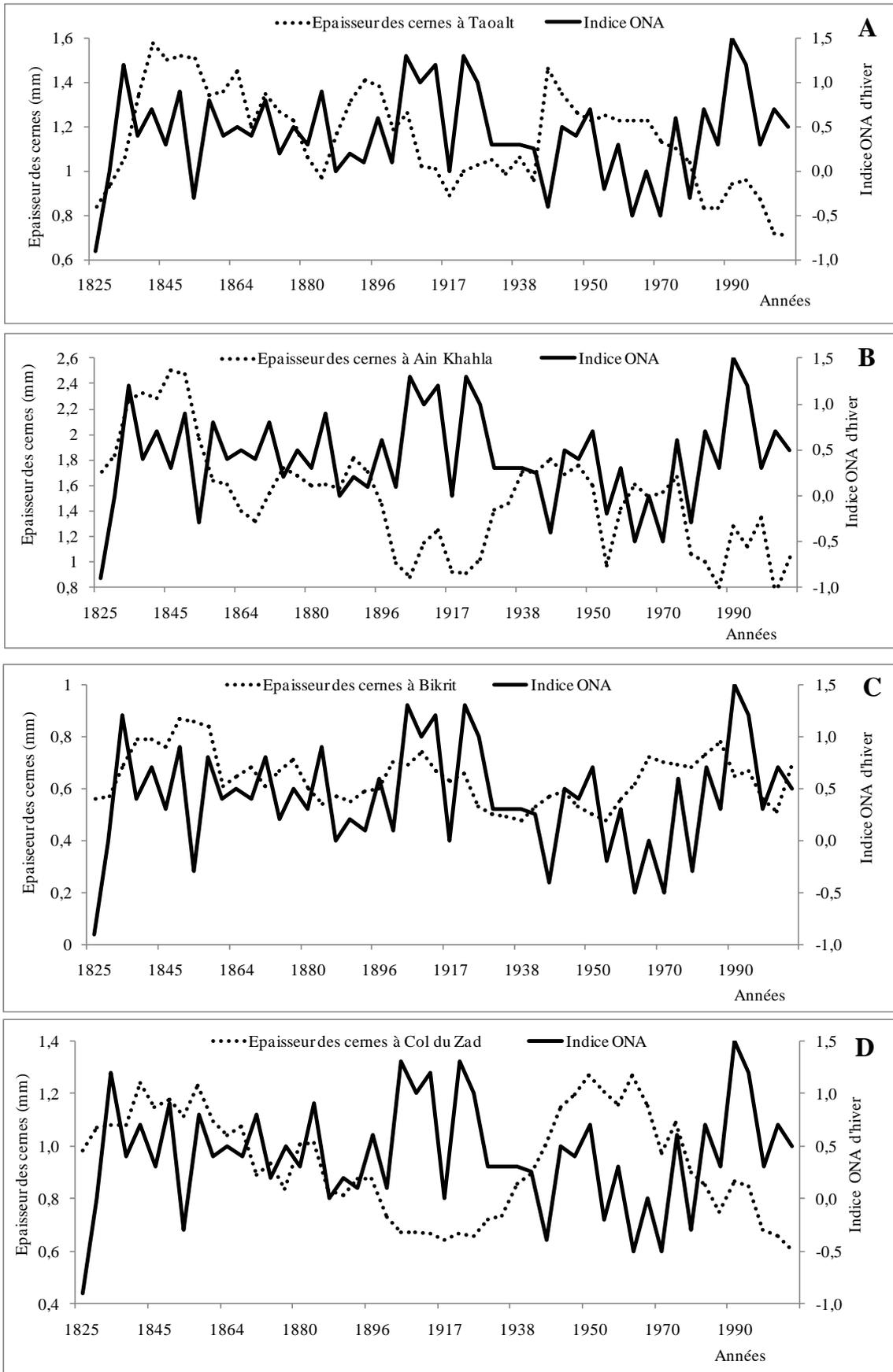


Figure 5. Corrélation entre la chronologie maîtresse du cèdre aux quatre sites étudiés et l'indice ONA d'hiver.

A. Site I (Taoalt), B. Site II (Ain Kahla), C. Site III (Bikrit), D. Site IV (Col du Zad).

Figure 5. Correlation between cedar master chronology in the four studied sites and winter NAO index.

A. Site I (Taoalt), B. Site II (Ain Kahla), C. Site III (Bikrit), D. Site IV (Col du Zad).



Figure 6. Vue de la cédraie de Bikrit dans le Moyen Atlas (Photo Ilmen 2013).

Figure 6. View of the cedar forest of Bikrit in the Middle Atlas (Photo Ilmen 2013)

Ces résultats montrent des successions d'hivers en mode positif ou négatif sans aucune tendance bien marquée. Les valeurs les plus élevées de l'indice de l'ONA indiquent des conditions climatiques plus sévères et plus défavorables à la croissance des cernes. Durant la période concernée par l'indice de l'ONA (1825-2000), on est en présence de peuplements à chronologies différentes entre les sites étudiés. Ces chronologies sont de 349, 514, 644 et 878 ans respectivement pour les sites II, I, III et IV (Tab. 1). D'une manière générale, pour cette période, les épaisseurs de cernes montrent des valeurs plus grandes dans les sites I et II, aux arbres plus jeunes, comparativement aux sites III et IV (Fig. 6). Cette différence peut s'expliquer en partie par les chronologies différentes entre les sites.

L'indice de l'ONA montre des variations interannuelles dont les plus grandes sont observées vers la fin du 19^{ème}-début 20^{ème} siècle et vers la fin du 20^{ème} siècle. Néanmoins, on observe clairement des périodes de plusieurs années où l'indice moyen est plutôt positif (1980-1998), et d'autres années où il est plutôt négatif (1955-1970). Les cernes étroits sont généralement caractérisés par un indice de l'ONA d'hiver supérieur à 0,25 (tendance vers la sécheresse), tandis que les anneaux larges sont associés à un indice de l'ONA qui tend plutôt à des valeurs négatives (moins de sécheresse et plus de fraîcheur).

Les sites II et IV montrent des tendances plus visibles entre les variations de l'indice de l'ONA et les épaisseurs des cernes par rapport aux autres sites I et III. Les pics de l'indice de l'ONA coïncident avec une diminution des épaisseurs de cernes, relation exprimée par un coefficient de corrélation négatif. En observant les chronologies de ces sites, on s'aperçoit que les sites II et IV (Fig. 7) enregistrent respectivement la plus faible chronologie (349 ans) et la plus grande (878 ans), et possèdent des substrats respectivement calcaire dolomitique et calcaire qui sont relativement plus filtrants par rapport aux substrats des autres sites qui sont des schistes marneux et du basalte (Tab. 1). Durant la période 1896-1938, l'analyse statistique a montré des corrélations plus faibles et non significatives (coefficient de détermination $R^2 < 7\%$) entre l'indice de l'ONA et les épaisseurs de cernes ($p < 0,05$) dans les sites étudiés. Ces

corrélations non significatives et dont les valeurs sont inférieures à 0,25 peuvent trouver leur explication, tout d'abord, de l'éloignement des sites étudiés de Lisbonne (Portugal) et Reykjavik (Islande), points référencés pour la mesure de pressions déterminant l'indice de l'ONA. Elles peuvent être expliquées aussi par les conditions locales des sites étudiés qui peuvent modifier le climat atmosphérique général de la région Nord-atlantique gouvernée par l'ONA. Ces dernières sont d'une importance certaine dans l'explication de la variation des épaisseurs de cernes.



Figure 7. Vue de la cédraie du Col du Zad dans le Moyen Atlas (Photo Ilmen 2013).

Figure 7. View of the cedar forest of Col du Zad in the Middle Atlas (Photo Ilmen 2013)

Si on restreint cette analyse des corrélations à la période 1900-2000 (20^{ème} siècle), les corrélations s'améliorent respectivement de 70 %, 131 % et 209 % pour les sites IV, II et I) et deviennent significatives ($p < 0,01$). Cependant, une légère diminution de 12 % a été observée sur le site III pour la même période.

DISCUSSION

On voit que la variation des épaisseurs des cernes de moyennes fréquences, matérialisant le minimum des courbes de croissance, est influencée par l'indice de l'ONA d'hiver dans les sites étudiés. En effet, cet impact varie de 17 % au Site IV à 2% au Site III de l'an 1900 à 2000. La meilleure corrélation a été décelée durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (1950-2000) : 21,5 % chez les cèdres du site I qui ont subi un effet négatif de l'ONA et qui se traduit par la réduction des épaisseurs des cernes. Ce constat est en concordance avec les résultats obtenus au Sud de l'Europe notamment en forêts italiennes (Piovesan & Schirone 2000).

Ces résultats sont en accord également avec les conclusions mettant en évidence une tendance à l'évolution du climat du Maroc, au cours du 21^{ème} siècle, vers des conditions plus chaudes et plus sèches (Born *et al.* 2008). Depuis 1980, on constate une diminution de la croissance des cernes au niveau des 4 sites étudiés ; sa corrélation avec la phase positive de l'ONA peut se traduire par l'installation de la sécheresse et la diminution du bilan hydrique des sols. Cependant, la forte augmentation de la pression anthropique, qui est la principale cause de la dégradation du tapis végétal, a pu jouer un rôle principal dans ce rétrécissement, en

association avec les variations de l'ONA, impact qui a perduré jusqu'à l'an 2000, soit 20 ans.

Les résultats de cet article viennent conforter les conclusions des recherches antérieures sur les séries de sécheresse au Maroc depuis le début des années 1980 (Esper *et al.* 2007). L'augmentation de l'effet de serre provoquée par l'homme qui agit sur la redistribution des masses d'air couplé avec l'impact humain sur les ressources forestières contribue probablement au ralentissement de croissance des cernes étudiés. Les résultats de la présente étude semblent montrer que l'ONA exerce une influence sur les précipitations hivernales marocaines qui lui sont négativement corrélées, du moins en ce qui concerne la zone étudiée.

Dans les cèdres des quatre sites étudiés, on observe des influences plus ou moins fortes de l'ONA dans la variation pluriannuelle de la croissance des cernes. Une baisse progressive de la croissance chez le cèdre, notée depuis les années 1970, trouve en partie son origine dans la persistance de l'ONA dans une phase positive. Néanmoins, la surexploitation du patrimoine forestier contribue également au déséquilibre écologique du cèdre, impactant négativement sa vigueur et sa vitalité. Des résultats similaires afférents à d'autres espèces forestières ont été rapportés dans d'autres études conduites dans le bassin méditerranéen (Hurrell & Van Loon 1997). Par conséquent le couplage de l'impact du climat avec celui de l'homme déterminent la croissance et la productivité du cèdre.

CONCLUSION

Les résultats préliminaires obtenus dans cette analyse permettent de confirmer que les chronologies du cèdre examinées contiennent un signal significatif de l'ONA : la réduction des épaisseurs des cernes depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle dans les quatre sites étudiés est attribuée à l'influence probable de l'ONA qui génère une réduction de pluviométrie au Maroc.

Nos résultats sont en concordance avec l'impact de l'ONA décelé dans d'autres pays du Sud du bassin méditerranéen, particulièrement en Algérie et en Tunisie. Par ailleurs, il s'avère nécessaire d'approfondir l'analyse et la quantification des relations cernes-ONA.

Dans la présente étude, en dépit des corrélations faibles entre la croissance des cèdres et l'ONA d'hiver, l'intérêt est de montrer l'existence de signaux climatiques dans les cernes des arbres. Il serait intéressant de mener des études plus détaillées couvrant les différentes forêts à l'échelle nationale et touchant à différentes espèces forestières plus ou moins éloignées de la zone de mesure de l'indice de l'ONA pour déterminer l'effet de l'éloignement sur le degré de corrélation cernes-ONA.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier vivement le comité éditorial sciences de la vie du Bulletin de l'Institut Scientifique et les lecteurs de cet article pour leurs utiles remarques, commentaires et suggestions.

REFERENCES

- Benabid A. 1982. *Études phytoécologique, biogéographique et dynamique des associations et séries sylvatiques du Rif occidental au Maroc*. Thèse Doct. ès-sc., Faculté des Sciences et Techniques Saint-Jérôme-France, 199 p.
- Born K., Christoph M., Fink A.H. *et al.* 2008. Moroccan climate in present and future: combined view from observational data and regional climate scenarios. *Springer Press*, 29-45.
- Cassou C., Terray L., Hurrell J.W. *et al.* 2004. North Atlantic Winter Climate Regimes: Spatial Asymmetry, Stationarity with Time, and Oceanic Forcing. *Journal of Climate*, 17, 1055-1068.
- Driouech F. 2010. *Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes*. Thèse Doctorat, Université de Toulouse-France, 164 p.
- Esper J., Büntgen U., Frank D. C. *et al.* 2007. 1200 years of regular outbreaks in alpine insects. *Proceedings of the Royal Society B. Biological Sciences*, 274, 671-679.
- Hurrell J.W. & van Loon H. 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climate Change*, 36, 301-326.
- Hurrell J.W. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- Ilmen R. 2014. *Fluctuations climatiques du passé récent au Maroc: Apport de la dendrochronologie du cèdre de l'Atlas*. Thèse Doctorat, Université Mohamed V Rabat-Maroc, 197 p.
- Ilmen R., Sabir A. & Benzyane M. 2014. Reconstruction dendroclimatique de la variation de température moyenne avril-juillet depuis 1776 AD dans le Moyen Atlas, Maroc. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 5, 1, 167-176.
- Lamb P.J. & Pepler R.A. 1987. North Atlantic Oscillation: concept and application. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 68, 1218-1225.
- Lebourgeois F. & Mérian P. 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement *Agro Paris Tech*, 85p.
- Piovesan G. & Schirone B. 2000. Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology*, 44, 121-127.
- Wanner H. & Beniston M. 1995. Approaches to the establishment of future climate scenarios for the alpine region: Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains. *IPCC Second Assessment Report*, 87-95.
- Weyhenmeyer G.A., Meili M. & Livingstone D.M. 2004. Nonlinear temperature response of lake ice breakup. *Geophysical Research Letters*, 31, 7, L07203.
- Xoplaki E., Gonzales-Rouco J.F., Luterbacher J. *et al.* 2004. Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large scale dynamics and trends, *Climate Dynamics*, 23, 63-78.

Manuscrit reçu le 23/12/2015

Version révisée acceptée le 27/07/2017

Version finale reçue le 18/10/2017

Mise en ligne le 23/10/2017