HAL open science

Bilan actuel et rétrospectif du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie)

Mohamed Sarmoum, Rafael Navarro-Cerrilo, Frédéric Guibal

To cite this version:

Mohamed Sarmoum, Rafael Navarro-Cerrilo, Frédéric Guibal. Bilan actuel et rétrospectif du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie). Bois et Forêts des Tropiques, 2019, 10.19182/bft2019.342.a31636 . hal-02353704

HAL Id: hal-02353704

https://amu.hal.science/hal-02353704

Submitted on 7 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Bilan actuel et rétrospectif du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie)

Mohamed Sarmoum[1]
Rafael Navarro-Cerrilo[2]
Frédéric Guibal[3]

[1] Université Ibn Khaldoun
Faculté des sciences de la nature
et de la vie
Laboratoire de physiologie végétale
appliquée aux cultures hors-sol
BP 78, 14000 Tiaret
Algérie

[2] Universidad de Córdoba
Departamento de Ingeniería Forestal
Grupo de Evaluación y Restauración
de Sistemas Agrícolas y Forestales
DendrodatLab
Campus de Rabanales, Crta. IV, km 396
14071 Córdoba
Espagne

[3] Institut méditerranéen de biodiversité
et d'écologie marine et continentale
Aix-Marseille Univ, Avignon Univ,
CNRS, IRD
3 Place Victor Hugo
13003 Marseille
France

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Mohamed Sarmoum –
sarmoum_med@yahoo.fr

Photo 1.
Dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie).
Photo M. Sarmoum.

Doi : 10.19182/bft2019.342. a31636

RÉSUMÉ

Bilan actuel et rétrospectif du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie)

Le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Algérie est un phénomène complexe qui a affecté les cédraies des Aurès et Theniet El Had depuis les années 1980, et dont les causes restent inconnues. Pour mieux comprendre l'évolution spatio-temporelle du dépérissement du cèdre de l'Atlas et établir une éventuelle relation avec les facteurs du milieu, notre travail s'est focalisé sur la cédraie de Theniet El Had. Ce travail est basé sur deux approches. L'une, spatiale, recense la répartition des arbres dépéris selon l'altitude, la pente, l'exposition, ainsi que leurs paramètres dendrométriques (diamètre, hauteur) et leur état de santé (taux de défoliation). L'autre, temporelle, compare l'évolution de la croissance radiale des arbres dépéris et des arbres sains dans six stations écologiques représentatives des peuplements de cèdre de l'Atlas dans la zone d'étude. Les résultats montrent que le phénomène de dépérissement du cèdre de l'Atlas a davantage marqué la cédraie de Theniet El Had vers sa limite inférieure, dans des stations situées à basse altitude, sur des terrains à forte pente et aux expositions ensoleillées et chaudes. Ce phénomène se présente dans un état avancé, et les arbres dépéris sont des arbres adultes et/ou âgés. Les arbres dépéris se distinguent par une faible croissance et une sensitivité moyenne au climat très élevée. En plus de l'effet de l'âge, la sécheresse prolongée dans la région au cours de la période 1980-2002 a affecté et aggravé l'état de santé du cèdre de l'Atlas. Ces résultats mettent au jour l'urgence d'entreprendre des travaux sylvicoles pour améliorer l'état de santé des peuplements et de mettre en place un dispositif de surveillance de la santé du cèdre.

Mots-clés : *Cedrus atlantica* Manetti, dépérissement, conditions du milieu, dendrométrie, croissance radiale, sécheresse, Theniet El Had, Algérie.

ABSTRACT

Assessment of current and previous dieback of Atlas cedars in Algeria's Theniet El Had National Park

Dieback of Atlas cedars is a complex phenomenon that has been affecting the cedar forests of the Aurès mountains and Theniet El Had since the 1980s. Its causes are still unknown. This study focused on the cedar forest of Theniet El Had in order to gain a better understanding of the way Atlas cedar dieback is evolving over time and space and to establish whether it has any relationship with environmental factors. Two approaches were applied. In the first, a spatial approach, the distribution of affected trees was mapped out according to altitude, slope, exposure, dendrometric parameters (diameter and height) and state of health (percentage of defoliation). In the temporal approach, radial growth rates were compared between affected and healthy trees in six ecological stations that were representative of Atlas cedar stands in the study zone. The results show that dieback is more severe in the Theniet El Had forest towards its lower limits in steeply sloping low-altitude stations exposed to sunlight and heat. Dieback is advanced and affects adult and/or aging trees. The trees affected stand out for their poor growth and very high average sensitivity to climatic factors. The prolonged drought in the region from 1980 to 2002 has exacerbated the effects of aging, which has affected and worsened the state of health of the Atlas cedars. These results point to the urgency of undertaking sylvicultural work to improve the health of these stands and to establish sampling plots.

Keywords: *Cedrus atlantica* Manetti, dieback, environmental conditions, dendrometrics, radial growth, drought, Theniet El Had, Algeria.

RESUMEN

Balance actual y retrospectivo del agostamiento del cedro del Atlas en el Parque Nacional de Theniet El Had, Argelia

El agostamiento del cedro del Atlas en Argelia es un fenómeno complejo que ha afectado a los cedrales de Aurès y Theniet El Had desde los años 1980, y cuyas causas todavía son desconocidas. Para comprender mejor la evolución espaciotemporal del agostamiento del cedro del Atlas y establecer una eventual relación con los factores del medio, nuestro trabajo se ha focalizado en el cedral de Theniet El Had. Este estudio se basa en dos enfoques. Uno, espacial, inventaría la repartición de los árboles agostados según la altitud, la pendiente, la exposición, así como sus parámetros dendrométricos (diámetro, altura) y su estado de salud (tasa de defoliación). El otro, temporal, compara la evolución del crecimiento radial de los árboles agostados y de los árboles sanos en seis estaciones ecológicas representativas de las masas de cedro del Atlas en la zona de estudio. Los resultados muestran que el fenómeno de agostamiento del cedro del Atlas ha afectado más al cedral de Theniet El Had hacia su límite inferior, en estaciones situadas a baja altitud, en terrenos de fuerte pendiente y con exposiciones soleadas y cálidas. Este fenómeno se presenta en un estado avanzado, y los árboles agostados son árboles adultos y/o viejos. Los árboles agostados se distinguen por un débil crecimiento y una sensitividad media al clima muy elevada. Además del efecto de la edad, la sequía prolongada en la región durante el período 1980-2002 afectó y agravó el estado de salud del cedro del Atlas. Estos resultados ponen al día la urgencia de emprender tareas silvícolas para mejorar el estado de salud de las masas e implementar un dispositivo de vigilancia de la salud del cedro.

Palabras clave: *Cedrus atlantica* Manetti, agostamiento, condiciones del medio, dendrometría, crecimiento radial, sequía, Theniet El Had, Argelia.

Introduction

Le dépérissement des forêts est un phénomène complexe qui a affecté plusieurs régions du monde depuis les années 1970, en particulier l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Afrique du Nord (Allen *et al.*, 2010).

Selon Manion (1991), « le dépérissement est un phénomène causé par un ensemble de facteurs interagissant et se succédant d'une façon particulière, et qui entraînent une détérioration générale, et graduelle, se terminant souvent par la mort de l'arbre ». Landmann (1994) indique que le mot dépérissement est l'équivalent du mot anglais *decline* qui signifie une mortalité des arbres due principalement aux facteurs abiotiques. Les facteurs qui sont à l'origine de ce phénomène sont nombreux (Landmann, 1994) et peuvent être classés en trois catégories : des facteurs prédisposants, tels que des conditions mésologiques difficiles, la compétition et le patrimoine génétique de l'arbre ; des facteurs déclenchants tels que la sécheresse ou la défoliation ; des facteurs aggravants qui interviennent après l'affaiblissement de l'arbre (attaque de parasites, par exemple).

Dans le contexte du dépérissement des forêts survenu au cours des années 1970, le dépérissement avait initialement été attribué à la pollution atmosphérique (dépôts acides et ozone) (Bonneau et Landmann, 1988 ; Fuhrer, 1990). Par la suite, plusieurs hypothèses ont été avancées comme causes de ce phénomène : sécheresse prolongée (Becker, 1987), déficit nutritionnel (Lebourgeois *et al.*, 1997), insectes parasites et agents pathogènes (Bouhot-Delduc et Lévy, 1994) et, à un moindre degré, actions sylvicoles inappropriées (Camarero *et al.*, 2011). Dans plusieurs régions du monde, le dépérissement des forêts semble étroitement corrélé avec les changements climatiques (Zimmermann *et al.*, 2015 ; Gazol *et al.*, 2017).

Le cèdre de l'Atlas est une espèce endémique et emblématique des hautes montagnes de l'Algérie et du Maroc dont l'aire de répartition s'étend sur une surface de 140 000 ha (Quézel et Médail, 2003). Cette espèce est sujette au phénomène de dépérissement depuis les années 1980 (Zine El Abidine, 2003 ; Bentouati et Bariteau, 2006 ; Kherchouche *et al.*, 2013 ; Sarmoum *et al.*, 2018). Ce phénomène, qui s'abat sur l'ensemble des forêts de cèdre de l'Afrique du Nord, et plus particulièrement dans le Parc national de Theniet El Had et dans les Aurès (Algérie), est l'expression de phénomènes complexes, aux causalités multiples et interdépendantes qui s'auto-entretiennent et amplifient la destruction de l'écosystème cédraie (Zine El Abidine, 2003 ; Bentouati et Bariteau, 2006). Cette situation n'engendre pas seulement des problèmes sociaux mais constitue également un handicap considérable pour l'économie nationale et met en danger un des patrimoines nationaux que représentent ces ressources forestières (Messaoudene *et al.*, 2013). Les investigations menées mettent en jeu les attaques de parasites (Zaremski *et al.*, 2007 ; Abdelhamid *et al.*, 2017), l'absence de travaux sylvicoles (Derak *et al.*, 2008) et la sécheresse prolongée (Kherchouche *et al.*, 2013 ; Linares *et al.*, 2013). Certains facteurs du milieu tels que les conditions édaphiques peuvent amplifier ce phénomène (Zine El Abidine *et al.*, 2014 ; Aoubouazza, 2017).

Notre travail porte sur la cédraie du Parc national de Theniet El Had, qui, depuis trois décennies, connaît une forte mortalité des arbres au sein des peuplements naturels. Notre objectif consiste à approfondir les connaissances sur ce phénomène par une approche spatio-temporelle qui vise à comprendre la répartition spatiale des arbres dépéris en fonction de l'altitude, la pente et l'exposition, à caractériser l'état de santé des arbres dépéris à l'aide de critères dendrométriques (diamètre, hauteur totale, taux de défoliation), et enfin à étudier l'évolution de la croissance radiale et l'état de santé des arbres dépéris au cours des deux derniers siècles.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

L'étude a été menée dans la cédraie de Theniet El Had (35°47'N et 35°54'N, 01°54'E et 02°02'E) rattachée au Djebel El Meddad et située dans le prolongement Est du massif de l'Ouarsenis (Sari, 1977). Sur le plan forestier, la cédraie est rattachée depuis 1983 au Parc national de Theniet El Had, d'une superficie totale de 3 460 ha, où la cédraie occupe une surface d'environ 1 000 ha (figure 1). La cédraie repose sur un substrat gréseux et marneux (Mattauer, 1958) et présente un relief globalement accidenté ; le sol est maigre et très pauvre en matière organique (Sari, 1977). Le cèdre de l'Atlas se développe surtout sur le versant nord à des altitudes allant de 1 300 m à 1 700 m ; sur le versant sud, l'altitude des cédraies varie de 1 500 à 1 786 m (Sarmoum *et al.*, 2018).

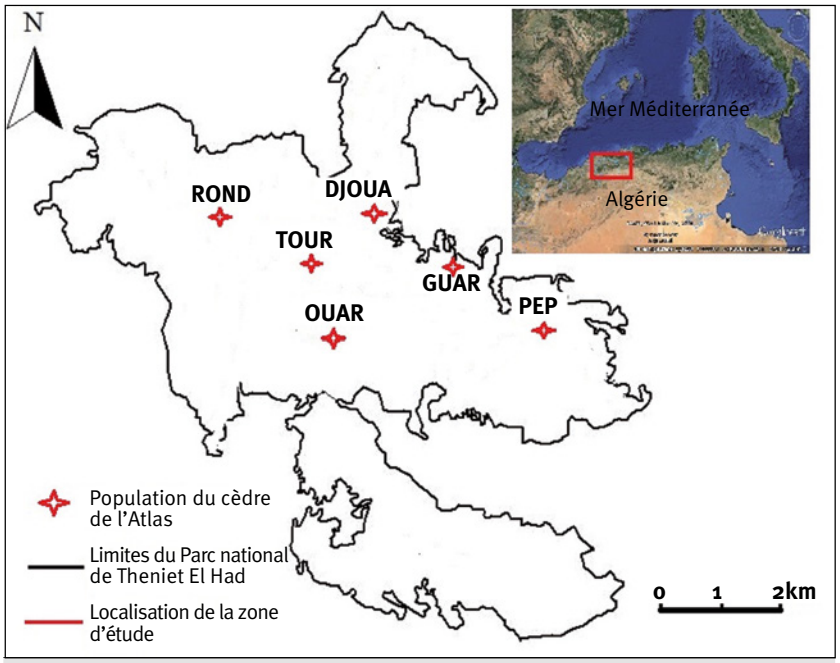

Figure 1.
Localisation géographique de la zone d'étude : Parc national de Theniet El Had et sites échantillonnés (image satellite extraite de Google Earth Pro, 2018).

Le climat de la zone d'étude varie selon l'altitude ; il est de type méditerranéen subhumide à hiver frais (‹ 1 500 m) et humide à hiver froid (› 1 500 m). L'étude des variations interannuelles des précipitations montre une tendance à la sécheresse durant les dernières décennies (1980-2010) avec une baisse des précipitations de l'ordre de 25 % par rapport à la période 1913-1938 (figure 2a). Cette baisse a marqué davantage la saison pluvieuse qui s'étend de l'hiver au printemps (figure 2b). Elle a entraîné un allongement de la période sèche (figure 2c) et un glissement des étages bioclimatiques vers l'aridité (Sarmoum *et al.*, 2016).

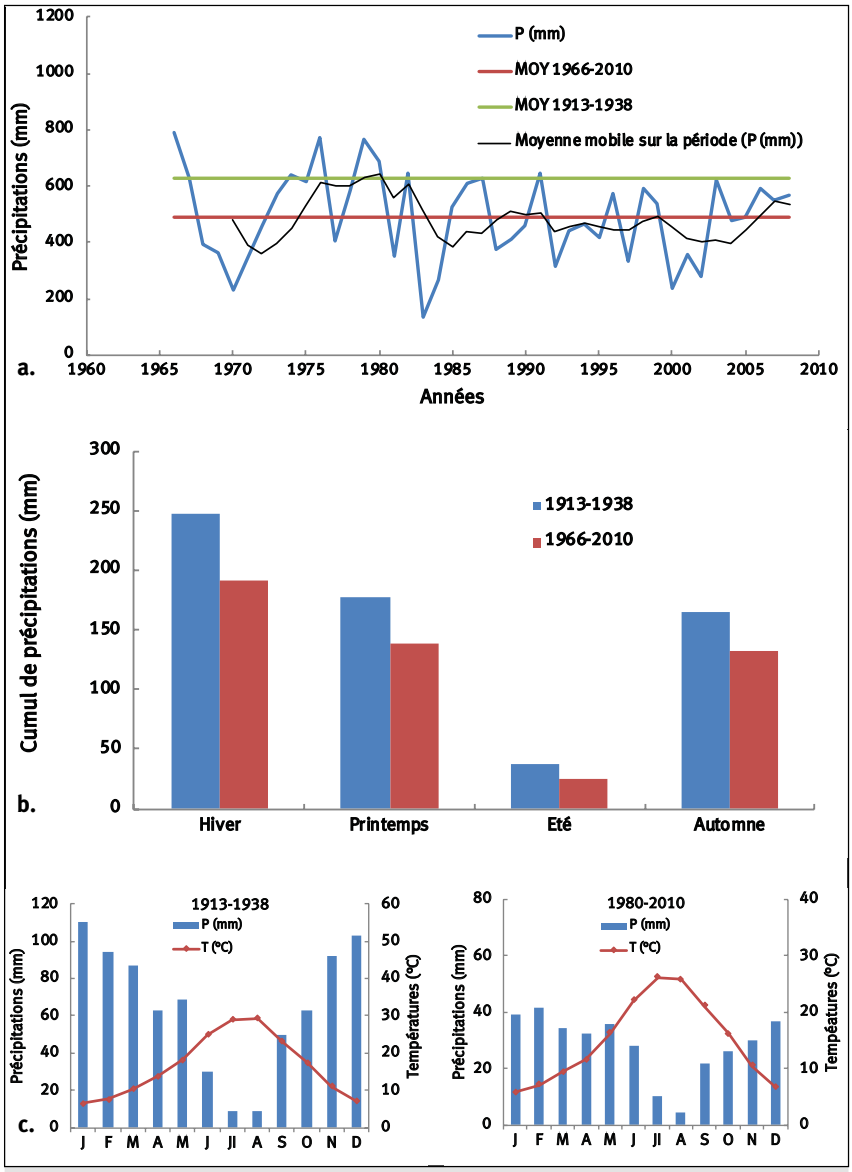

Figure 2.
Tendance climatique actuelle dans la zone d'étude. (a) Variations des précipitations annuelles (P) sur la période 1966-2010 avec MOY : moyenne des précipitations. (b) Variations de cumul des précipitations saisonnières (mm) sur les périodes 1913-1938 et 1966-2010. (c) Diagramme ombrothermique de Bagnols et Gaussen sur les périodes 1913-1938 et 1980-2010 illustrant l'augmentation de la période sèche dans la zone d'étude.

Collecte des données mésologiques et taux de défoliation

Compte tenu de la complexité du phénomène étudié, nous avons procédé à la méthode d'inventaire d'arbres dépéris pied par pied dans toute la cédraie touchée (Pardé et Bouchon, 1988 ; Rondeux, 1999). Pour ce faire, le découpage en cantons établi par le service forestier a été suivi, chaque canton étant subdivisé en parcelles et sous-parcelles de superficie souvent inégale. L'inventaire a été réalisé sur toutes les sous-parcelles qui présentent des arbres dépéris. Pour chaque arbre dépéri, les coordonnées géographiques, l'altitude, l'exposition, la pente et son taux de défoliation ont été relevés.

Le taux de défoliation est décrit par le taux de perte de feuillage au niveau du houppier. Ce critère est souvent utilisé pour établir le bilan de santé des peuplements forestiers, appelé aussi indice de transparence du houppier (Becker, 1987 ; Thomas *et al.*, 2002). Il est basé sur une observation visuelle après avoir divisé le houppier en quatre parties, de la partie supérieure « cime » jusqu'à la base du houppier vivant (D'Eon *et al.*, 1995). La partie dépérie correspond à la partie transparente qui a perdu son feuillage. En se basant sur ce critère, cinq classes de défoliation sont définies : 0, arbre sain ; I, défoliation ‹ 25 % ; II, 25 ‹ défoliation ‹ 50 % ; III, 50 ‹ défoliation ‹ 75 % ; IV, défoliation › 75 % ; V, arbre mort sur pied.

Collecte des données dendrométriques

L'inventaire de dépérissement a permis de localiser six stations écologiques d'une surface de 0,3 ha (60 m x 50 m) (tableau I). Le choix des stations est dicté par la présence d'arbres dépéris (› 10 arbres) et de toutes les classes de défoliation. Le nom de la station porte les premières lettres du canton où elle se situe (tableau I).

Pour chaque station, les mesures dendrométriques ont été prises pour l'ensemble des arbres, dépéris et sains, de la station :

- le diamètre, mesuré à l'aide d'un compas forestier à une hauteur de tronc de 1,30 m (Rondeux, 1999) ;
- la hauteur totale de chaque arbre, mesurée à l'aide du dendromètre Blume-Leiss (Rondeux, 1999).

Étude dendrochronologique

Dans chaque station, une population de treize arbres a été choisie, dont dix arbres dépéris, répartis sur les différentes classes du dépérissement, et trois arbres sains, choisis parmi les arbres dominants et co-dominants, et qui ne présentent aucune anomalie (Lanier *et al.*, 1994). Pour chaque arbre, deux carottes

Tableau I.
Caractéristiques écologiques et mésologiques des sites d'étude. Ca : *Cedrus atlantica* ; Qi : *Quercus ilex* ; Qf : *Quercus faginea* ; Ph : *Pinus halepensis* ; Qs : *Quercus suber*.

Sites d'étude	Altitude (m)	Exposition	Pente (%)	Roche mère	Bioclimat	Type de peuplement
PEP	1 460	NNE	20-30	Marne	Subhumide à hiver frais	Ca (100 %)
TOUR	1 520	NE	30-40	Colluvions de grès	Humide à hiver froid	Ca (100 %)
GUAR	1 325	NW	30-40	Colluvions de grés	Subhumide à hiver frais	Ca (100 %)
DJOUA	1 425	NE	40-50	Colluvions de grès	Subhumide à hiver frais	Ca + Ph + Qi
ROND	1 420	NNW	10-20	Colluvions de grès	Subhumide à hiver frais	Ca + Qf + Qi
OUAR	1 590	SW	40-50	Colluvions de grès	Humide à hiver froid	Ca + Qf + Qs

NNE : Nord-Nord-Est ; NE : Nord-Est ; NW : Nord-Ouest ; NE : Nord-Est ; NNW : Nord-Nord-Ouest ; SW : Sud-Ouest.

ont été prélevées à 1,30 m du sol. Les carottes ont été collées sur des réglettes en bois préalablement rainurées à leur diamètre et interdatées par intercomparaison visuelle sous la loupe binoculaire (Stokes et Smiley, 1968 ; Fritts, 1976). Les mesures des largeurs de cernes annuelles ont été effectuées à l'aide d'une machine LinTab05®, couplée au logiciel TSAP® (*Time Series Analysis and Presentation*) couramment utilisé dans les études dendroécologiques. Le logiciel permet de mesurer la largeur totale du cerne annuel avec une précision de 1/1 000 de millimètre et de vérifier le synchronisme entre les séries de largeurs de cernes. Les épaisseurs des cernes de chaque carotte fournissent une série élémentaire ; la moyenne de deux séries élémentaires représentatives des deux carottes d'un même arbre fournit une série individuelle. La chronologie maîtresse de la population résulte de la moyenne, année par année, des épaisseurs des cernes de toutes les séries élémentaires. Pour chaque population, deux séries maîtresses ont été élaborées, celle des arbres dépéris et celle des arbres sains. La chronologie globale de chaque population représente la moyenne des épaisseurs des cernes de tous les arbres de la même station, dépéris et sains.

Traitement et analyse des données

Les données dendrométriques et mésologiques récoltées ont été représentées graphiquement sous forme d'histogrammes pour mieux apprécier la distribution des arbres dépéris dans les différentes classes (altitude, pente, exposition, taux de défoliation, diamètre, hauteur).

Les variables dendrométriques (hauteur totale et diamètre) relatives aux arbres dépéris et sains récoltées au niveau de chaque station ont fait l'objet de calculs de paramètres statistiques (moyenne, écart-type). La comparaison post-hoc des moyennes a été effectuée par le test Tukey après analyse de la variance à un seul facteur (ANOVA). Une fonction d'ajustement normale sur la distribution des fréquences de tiges dans les classes de diamètre ou hauteur totale a été choisie et testée par les tests de Kolmogorov-Smirnov (Sokal et Rohlf, 1995). Pour tous les tests statistiques appliqués, l'hypothèse nulle a été rejetée au seuil de signification de $P \leq 0{,}05$. Les traitements statistiques ont été effectués à l'aide du package Statistica 6.0 et SPSS 16.0.

Pour comparer les rythmes de la croissance radiale des arbres dépéris et sains, les séries maîtresses de chaque station ont été reportées sur le même graphique dont les années figurent en abscisses et l'épaisseur des cernes en ordonnées. Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée pour étudier la variabilité spatio-temporelle des épaisseurs des cernes des différentes séries chronologiques. En un premier temps, les observations (années) sont projetées dans les différents axes factoriels afin de déceler la variabilité temporelle des épaisseurs des cernes. En un second temps, les variables exprimées par les populations sont projetées afin de déceler la variabilité spatiale (Fritts, 1976). En outre, les paramètres statistiques suivants ont été calculés :

- le coefficient de corrélation (R) qui permet de mesurer le degré de ressemblance entre deux séries chronologiques (arbres sains et dépéris) ; un coefficient de corrélation élevé et significatif indique un bon synchronisme dans les variations des épaisseurs des cernes des deux séries et, par conséquent, des facteurs communs qui agissent sur la croissance des arbres (Fritts, 1976) ;
- l'épaisseur moyenne des cernes (EMC) et son écart-type, l'EMC étant la somme de toutes les épaisseurs des cernes d'une chronologie divisée par le nombre de cernes : $EMC = \sum Ci/N$ avec : Ci, épaisseur de cerne de l'année n ; N, nombre total de cernes ; l'écart-type mesure la dispersion des valeurs de l'EMC autour de la moyenne ;
- la sensitivité moyenne (SM), moyenne du rapport de la différence des épaisseurs de deux cernes successifs à leur moyenne, et calculée par la formule (Fritts, 1976) : $SM = 1/(N-1)\sum 2*(Xi - Xi-1)/(Xi + Xi-1)$ avec : N, nombre de cernes ; Xi, épaisseur du cerne de l'année n ; Xi – 1, épaisseur du cerne de l'année n – 1. Ce coefficient mesure l'ampleur des changements affectant à court terme l'épaisseur des cernes et varie de 0, pour deux cernes successifs égaux, à 2 lorsque l'épaisseur de l'un d'entre eux est nulle ; il exprime donc, en partie au moins, la sensitivité des arbres aux variations interannuelles du climat (Fritts, 1976).

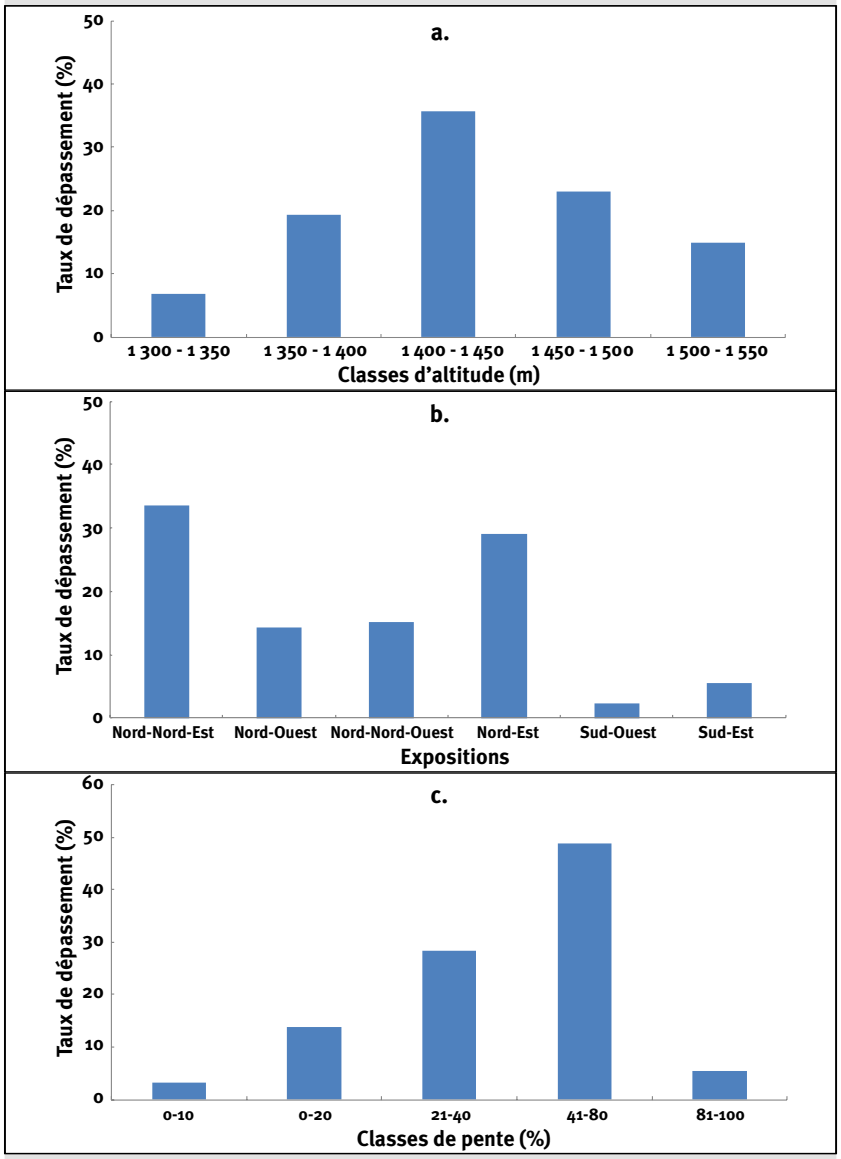

Figure 3.
Répartition des arbres dépéris selon les conditions mésologiques. (a) : Répartition des arbres dépéris selon les classes d'altitude (m) dans la zone d'étude avec une tendance de diminution du taux de dépérissement en fonction de l'altitude. (b) : Répartition des arbres dépéris selon l'exposition, le taux de dépérissement le plus élevé est enregistré dans les expositions chaudes et ensoleillées. (c) : Répartition des arbres dépéris selon les classes de pente (%), le taux le plus élevé de dépérissement caractérise les sites à forte pente (› 50%).

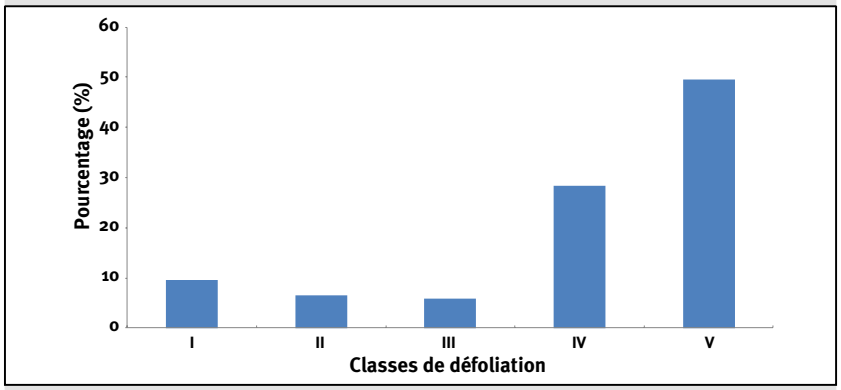

Figure 4.
Répartition des arbres dépéris (%) selon le taux de défoliation. I : défoliation ‹ 25 % ; II : 25 % ‹ défoliation ‹ 50 % ; III : 50 % ‹ défoliation ‹ 75 % ; IV : défoliation › 75 % ; V : arbre mort sur pied.

Résultats

Variables mésologiques

Le dépérissement est fréquent aux basses altitudes. La tranche altitudinale de 1 400 à 1 500 m constitue la classe la plus affectée, avec un taux de 35 % (figure 3a). Le phénomène diminue avec l'altitude. Les faibles fréquences enregistrées dans les deux premières classes (altitude ‹ 1 400 m) semblent liées à la structure du peuplement forestier car le cèdre est faiblement représenté dans cette tranche altitudinale (Sarmoum *et al.*, 2018).

Le dépérissement est observé à toutes les expositions (figure 3b) mais les expositions orientées vers l'Est (NE, NNE, SE) apparaissent les plus affectées (62 % de l'effectif total).

La pente semble aussi jouer un rôle important dans le dépérissement : 54 % des arbres dépéris se situent sur des pentes de l'ordre de 50 à 100 % (figure 3c). Le dépérissement est moins fréquent sur les terrains à pente moyenne comprise entre 25 et 50 % (29 %) et sur les terrains plats (17 %).

État de santé et variables dendrométriques

L'état actuel du dépérissement dans la zone d'étude indique des situations variées. Les symptômes du dépérissement sont une défoliation progressive associée à l'évolution des états sanitaires pouvant aller jusqu'à la mort de l'arbre. Quant aux variations spatiales, le dépérissement se manifeste souvent par des arbres isolés ou des taches isolées et très rarement en dépérissement massif.

Taux de défoliation

La distribution des arbres dépéris en fréquence relative (%) dans les différentes classes de défoliation (figure 4) montre une dominance de la classe V (arbres morts sur pied) avec un taux de 49 %. La classe IV, représentant les sujets dépéris à 75 %, est située en deuxième position avec un taux de 28 %. Les autres classes (défoliation inférieure à 75 %) ne représentent que 23 % du total.

Diamètre

L'analyse du diamètre montre, d'une manière générale, que le dépérissement n'est pas spécifique à une classe bien déterminée. Néanmoins, la figure 5 montre que les arbres appartenant aux classes de diamètre intermédiaires (20-60 cm) et élevées (› 60 cm) sont les plus touchés par le dépérissement. La comparaison des diamètres des arbres dépéris et sains

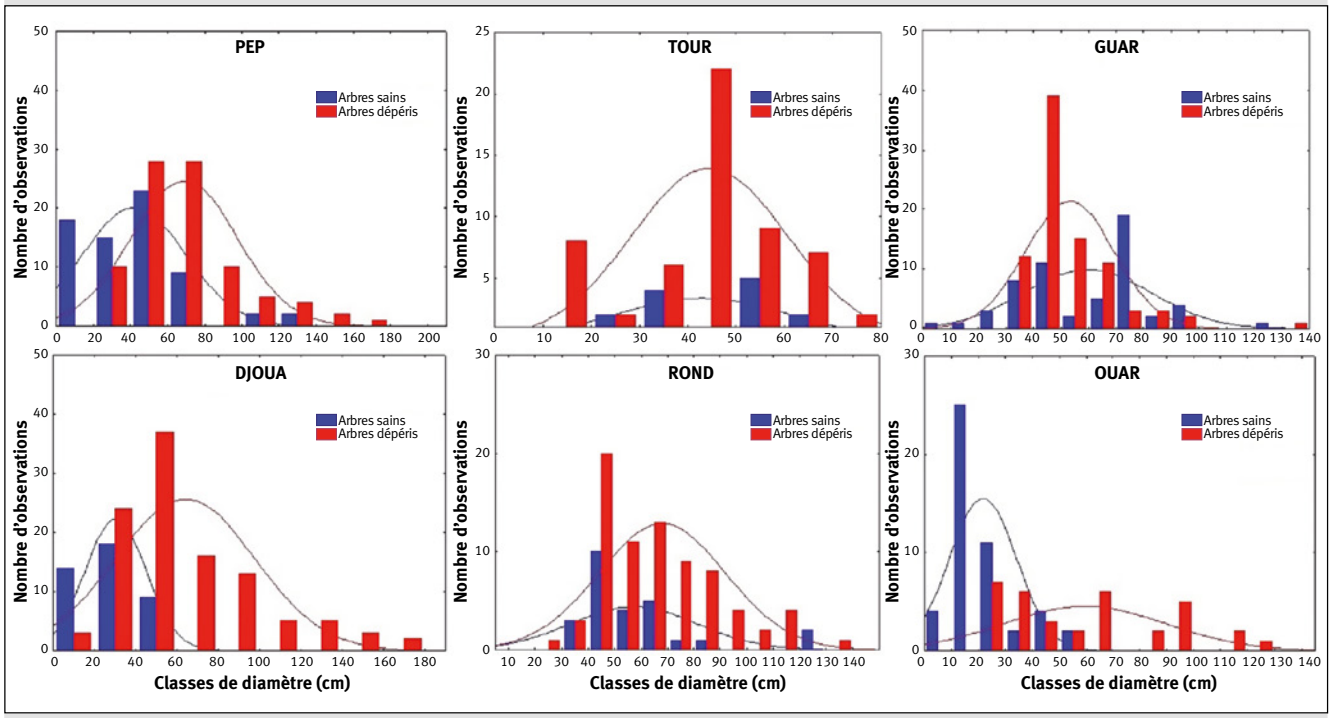

Figure 5.
Répartition des arbres dépéris (AD) et des arbres sains (AS) selon les classes de diamètre (cm), pour les différentes stations écologiques.

montre une différence hautement significative (F = 64,84 ; P ≤ 0,01). En effet, la moyenne du diamètre des arbres dépéris est supérieure à celle des arbres sains chez la plupart des populations, à l'exception de la population GUAR (tableau II). La différence enregistrée pour les diamètres des arbres dépéris et sains est très significative entre les différentes populations (F = 14,1 ; P ≤ 0,01) localisées dans des conditions écologiques différentes. L'analyse de la distribution des tiges dans les différentes classes de diamètre (figure 5) montre que la plupart des populations, à l'exception de la population TOUR, présentent une distribution normale. Chez les arbres dépéris, seule la population DJOUA présente cette distribution (tableau II).

Hauteur totale

Le dépérissement n'est pas spécifique d'une classe déterminée. Néanmoins, les classes 10-15 m et 15-20 m sont les plus affectées (figure 6). La moyenne de la hauteur des arbres dépéris est supérieure à celle des arbres sains pour les populations PEP, DJOUA, ROND et OUAR (tableau II), tandis que, chez les populations TOUR et GUAR, la moyenne de la hauteur des arbres sains est supérieure à celle des arbres dépéris. Ces différences sont très peu significatives à l'intérieur de la même population (F = 0,01 ; P ≤ 0,01), mais hautement significatives entre les populations (F = 33,77 ; P ≤ 0,01), résultat de leurs biotopes différents. Il faut noter que les populations TOUR et GUAR ont fait l'objet d'une opération d'assainissement (abattage des arbres dépéris) durant la période 1987-1992 (Messaoudene *et al.*, 2013), ce qui peut expliquer cette différence de hauteur enregistrée entre les arbres dépéris et sains.

Tableau II.
Valeurs dendrométriques moyennes et leurs écarts-types des arbres dépéris et des arbres sains par station. Seuils de signification du test Kolmogorov-Smirnov sur la distribution des fréquences par rapport à l'ajustement normal. Avec Ns : non significative ; * : significative (P ≤ 0,05) ; ** : très significative (P ≤ 0,01) ; ABCD : groupes homogènes des populations après analyse de la variance et comparaison post-hoc (test Tukey) des moyennes.

	Hauteur moyenne ± écarts types		Diamètre moyen ± écarts types	
	Arbres dépéris	Arbres sains	Arbres dépéris	Arbres sains
PEP	17,06 ± 4,63 (Ns) B	12,57 ± 7,88 (**) B	68,62 ± 28,52 (Ns) BC	41,75 ± 27,51 (**) BC
TOUR	13,91 ± 6,21 (Ns) BC	22,30 ± 8,99 (Ns) BC	44,25 ± 16,01 (*) A	42,82 ± 17,97 (Ns) A
GUAR	13,81 ± 2,92 (Ns) B	17,23 ± 5,02 (**) B	53,04 ± 16,11 (**) BC	59,48 ± 22,98 (**) BC
DJOUA	11,08 ± 4,44 (**) A	8,68 ± 5,27 (**) A	63,67 ± 33,55 (**) B	30,09 ± 14,71 (*) B
ROND	17,77 ± 4,92 (Ns) C	16,44 ± 6,81 (**) C	67,68 ± 23,97 (Ns) C	57,01 ± 23,76 (**) C
OUAR	13,20 ± 6,96 (Ns) A	8,71 ± 2,70 (**) A	68,62 ± 28,52 (Ns) A	21,60 ± 12,31 (Ns) A

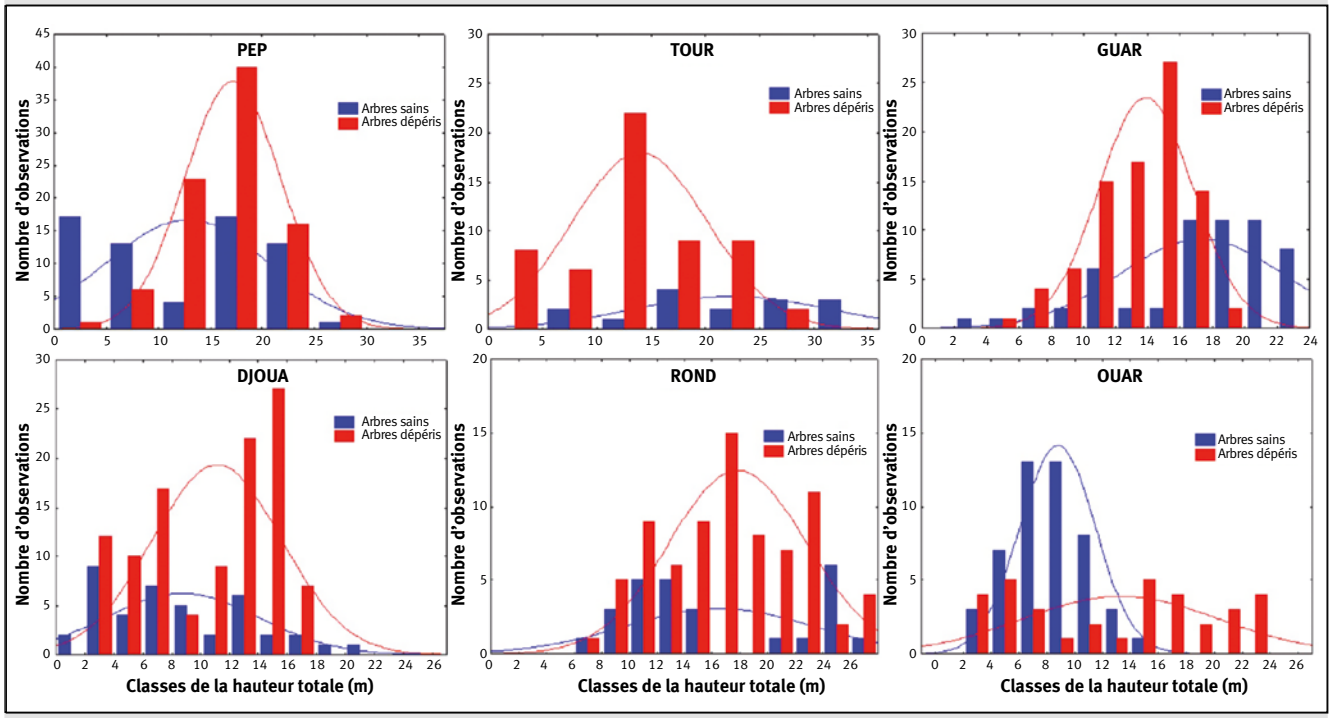

Figure 6.
Répartition des arbres dépéris et des arbres sains selon les classes de la hauteur totale (m), pour les différentes stations écologiques.

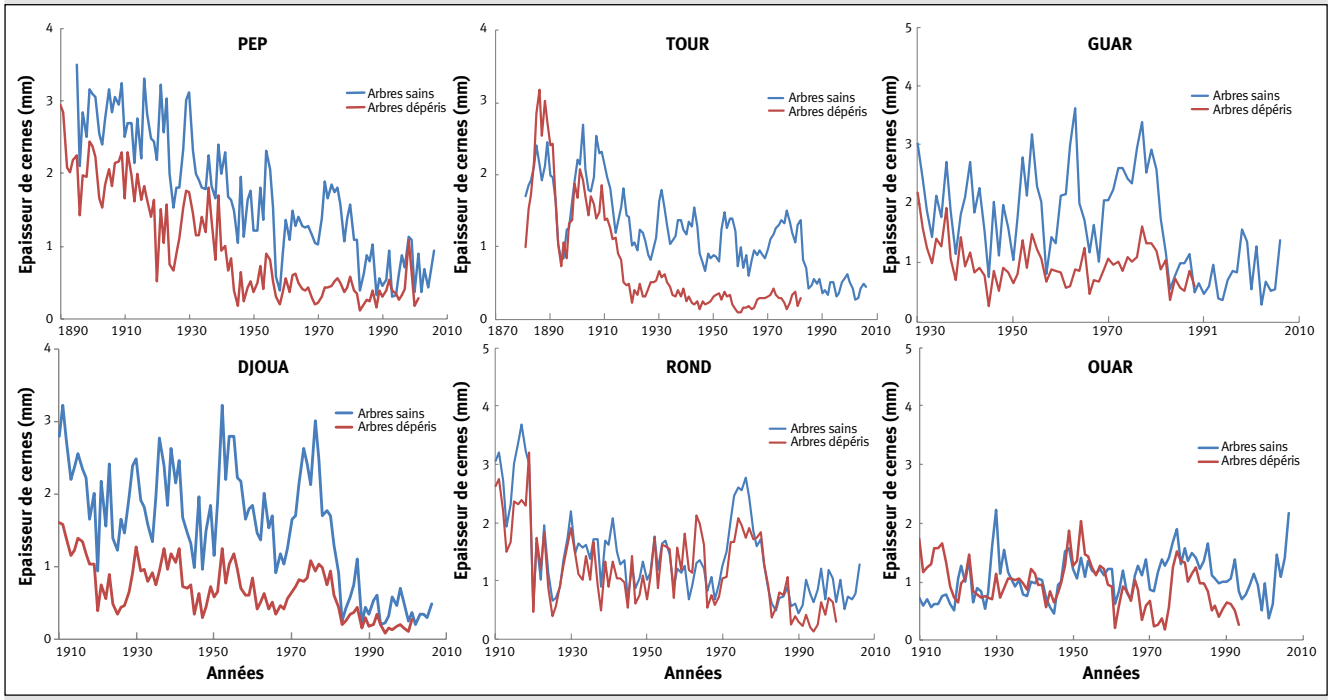

Figure 7.
Variations interannuelles des épaisseurs des cernes chez les arbres dépéris et les arbres sains, pour les différentes stations écologiques.

Par ailleurs, l'analyse de la distribution des tiges dans les différentes classes de hauteur (figure 6) montre une distribution normale chez les arbres dépéris des populations TOUR, GUAR et DJOUA et chez les arbres sains des populations PEP, GUAR, ROND (tableau II).

Analyse dendrochronologique

L'analyse de la croissance radiale montre un bon synchronisme dans les variations des épaisseurs annuelles des cernes des différentes populations (arbres sains et dépéris), comme le montrent les valeurs des coefficients de corrélation qui s'échelonnent entre 0,59 et 0,90 (tableau III). Ce résultat suggère la présence d'un facteur commun qui agit sur la croissance des arbres et pourrait être d'origine climatique.

La comparaison des chronologies de cernes des arbres dépéris et sains montre une faible activité cambiale chez les arbres dépéris, marquée par des cernes très minces, en particulier ces dernières décennies (figure 7). En effet, les valeurs de l'EMC des arbres dépéris sont toujours plus faibles que celles des arbres sains, et ce pour toutes les populations (tableau III). L'analyse de la variance a révélé une différence très significative entre les épaisseurs des cernes des arbres dépéris et sains à l'intérieure de la même population ($F = 645$; $P \leq 0{,}01$) et entre les différentes populations ($F = 76$; $P \leq 0{,}01$). Cette différence de croissance peut être constatée dès le début de la série chronologique pour les populations PEP, GUAR et DJOUA. Pour la population TOUR, cette différence est marquée depuis les années 1920 ; pour les populations OUAR et ROND, la différence de croissance radiale commence à apparaître, respectivement, dans les années 1960 et 1980. Pour l'ensemble des populations, cette différence de croissance devient plus nette après une chute de croissance qui affecte l'ensemble des populations lors des années 1920, 1945 et 1983.

La sensitivité moyenne est plus élevée chez les arbres dépéris que chez les arbres sains, notamment pour les populations PEP, TOUR et ROND (tableau III). La comparaison des valeurs de la sensitivité moyenne calculée sur les chronologies globales et sur la période 1980-2010 montre une élévation très marquée de la sensitivité moyenne pour la période récente (tableau III). Les valeurs pour la période 1980-2010 varient de 0,18 à 0,42. Hormis les populations OUAR et TOUR qui manifestent une faible sensitivité (0,18 et 0,22 respectivement) sur la période récente, les autres populations sont marquées par des valeurs très élevées allant de 0,34 à 0,42. Ceci indique une augmentation de la sensitivité du cèdre aux fluctuations climatiques au cours de ces dernières années, marquées par la persistance de la sécheresse. Le déclin de la croissance radiale a en effet affecté également les arbres sains à partir des années 1980, ce qu'atteste la succession de cernes très minces durant les années 1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1993, 1994, 1999, 2001, 2002, 2005 et 2006 (figure 8a).

Photo 2.
Évolution du dépérissement du cèdre de l'Atlas exprimée par une perte progressive du feuillage.
Photo M. Sarmoum.

Tableau III.
Paramètres dendrochronologiques relatifs aux sites échantillonnés. EMC : épaisseur moyenne des cernes et son écart-type (ET). ABCD : groupes homogènes des populations après analyse de la variance et comparaison post-hoc (test Tukey) des épaisseurs moyennes des cernes. R : coefficient de corrélation entre la croissance des arbres dépéris et des arbres sains. SM : sensitivité moyenne.

	EMC ± ET arbres dépéris	EMC ± ET arbres sains	Coefficient de corrélation R	SM arbres dépéris	SM arbres sains	SM Chronologie globale	SM 1980-2010
PEP	1,27 ± 0,73 C	1,63 ± 0,84 C	0,90	0,33	0,31	0,25	0,40
TOUR	1,02 ± 0,76 A	1,20 ± 0,56 A	0,80	0,29	0,26	0,19	0,22
GUAR	1,46 ± 0,36 D	1,77 ± 0,80 D	0,66	0,36	0,36	0,30	0,39
DJOUA	1,07 ± 0,37 BC	1,32 ± 0,81 BC	0,90	0,32	0,32	0,27	0,42
ROND	1,21 ± 0,66 D	1,39 ± 0,74 D	0,87	0,34	0,29	0,29	0,34
OUAR	0,74 ± 0,38 B	0,91 ± 0,35 B	0,59	0,25	0,25	0,16	0,18

La projection des populations dans les axes 1 et 2 de l'ACP (figure 8b), qui explique 80 % de la variance totale, met en évidence deux groupes de populations :

- le groupe 1, formé par les populations GUAR, DJOUA et PEP, caractérisées par une sensitivité moyenne élevée (SM › 0,20), et localisées à des altitudes faibles (‹ 1 500 m) et/ou croissant sur substrat marneux (PEP) ;
- le groupe 2, constitué des populations OUAR et TOUR, marquées au contraire par une sensitivité faible (SM ‹ 0,20), localisées à des altitudes relativement élevées (› 1 500 m) et installées sur substrat gréseux.

Discussion

L'inventaire de l'état actuel du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans la cédraie de Theniet El Had montre que ce phénomène a davantage affecté la cédraie aux altitudes basses, sur les terrains à forte pente et aux expositions chaudes et ensoleillées (NNE, NE et SE). L'analyse des paramètres dendrométriques montre que les arbres dépéris sont caractérisés par un diamètre et une hauteur élevés, ce qui suggère que ce phénomène touche des arbres adultes et/ou âgés, ces arbres se trouvant dans un stade de dépérissement avancé (défoliation › 75 %).

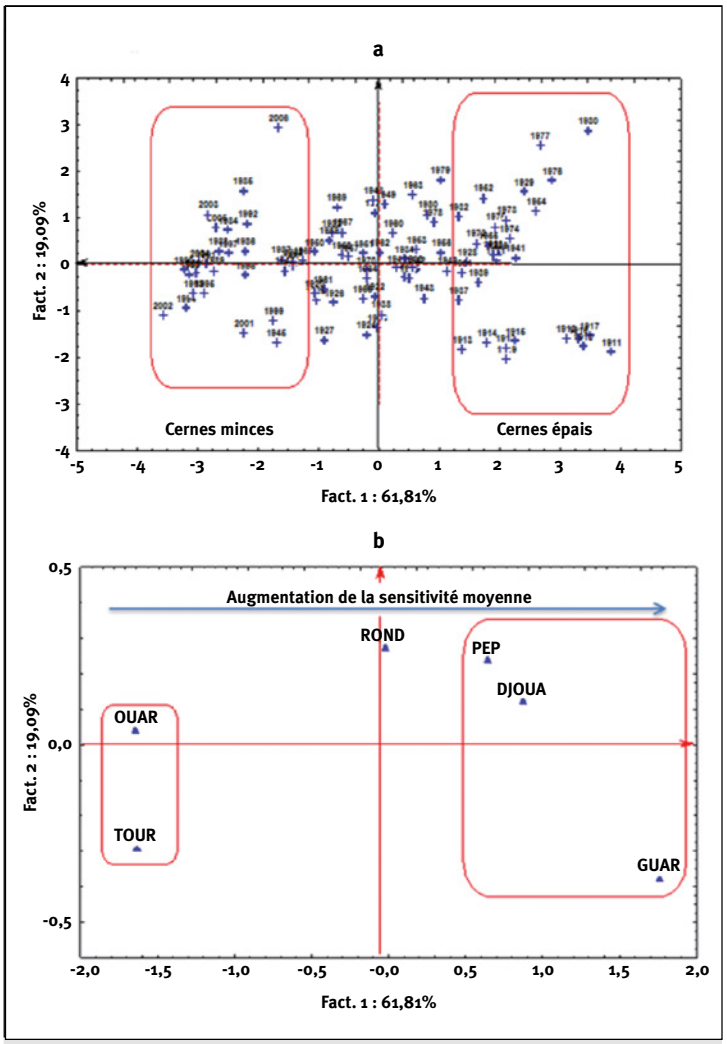

Figure 8.
Analyse en composantes principales des épaisseurs des cernes, représentées dans le plan factoriel principal (80 % de la variance totale). (a) Projections des observations (années). (b) Projections des variables (populations). Fact. 1 : facteur 1 ; Fact. 2 : facteur 2.

Dans ces conditions, la cédraie apparaît prédisposée au phénomène du dépérissement. En effet, à basse altitude, elle reçoit des précipitations moins importantes qu'à des altitudes élevées, et elle est soumise à de fortes températures, notamment en exposition ensoleillée. De plus, la forte déclivité des terrains contribue à accentuer le déficit hydrique (Hasnaoui *et al.*, 2006 ; Zine El Abidine *et al.*, 2014). L'âge avancé des arbres semble amplifier cette situation car, avec l'âge, les arbres perdent leur vigueur (Thomas *et al.*, 2002 ; Linares *et al.*, 2013).

Les populations soumises à ces conditions sont caractérisées par une sensitivité moyenne plus élevée que les populations de haute altitude. Selon Fritts (1976), c'est souvent au centre de son aire de répartition qu'une espèce est la moins limitée par les facteurs climatiques. En bordure de son aire de répartition, le climat est plus limitant.

L'analyse rétrospective de la croissance radiale a révélé que les arbres dépéris manifestaient des difficultés de croissance dès leur jeune âge. Cette variabilité individuelle dans le comportement écophysiologique des arbres (potentiel hydrique négatif, déficience dans la croissance, l'absorption racinaire et le contrôle stomatique) paraît jouer un rôle important dans la réaction du cèdre à la variation des facteurs écologiques, notamment climatiques (Zine et Abidine *et al.*, 2014 ; Aoubouazza, 2017). Cette difficulté, traduite dans la croissance des arbres dépéris, s'aggrave après les années de sécheresse, comme le montrent les observations aux années 1881, 1920, 1945, 1961, 1984 et 2002. Cela entraîne une perte progressive de vitalité qui se matérialise par une mortalité des arbres (Touchan *et al.*, 2008).

Ces résultats corroborent ceux obtenus par Zine El Abidine (2003) et Rhanem (2011) au Maroc, et Bentouati et Bariteau (2006) dans les Aurès, qui concluent que le dépérissement est le résultat de plusieurs facteurs (évolution du climat, absence de sylviculture, conditions de milieu) ou de leur interaction. Aoubouazza (2017) a constaté que le dépérissement du cèdre de l'Atlas au Maroc était plus élevé sur les sols riches en argile à cause de leur mauvaise perméabilité qui se répercute sur le bilan hydrique du sol. Toutefois, le stress hydrique dû à la sécheresse qui persiste depuis plus de 20 ans apparaît, dans de nombreux cas, comme le facteur prédisposant et/ou déclenchant majeur (Linares *et al.*, 2013 ; Kherchouche *et al.*, 2013). En effet, le fonctionnement physiologique du cèdre de l'Atlas dépend essentiellement de l'approvisionnement en eau, qui est entravé depuis plus de 20 ans du fait de la récurrence des épisodes de sécheresse (Ladjal *et al.*, 2007 ; Gaba-Chahboub *et al.*, 2016). Les peuplements forestiers exposés à de telles situations sont constitués d'arbres affaiblis et sont le plus souvent attaqués par des agents pathogènes et des insectes xylophages (Rouault *et al.*, 2006). Ces constats peuvent expliquer l'apparition du phénomène de dépérissement du cèdre de l'Atlas après de longues périodes de sécheresse (Touchan *et al.*, 2008 ; Linares *et al.*, 2013).

Conclusion

Cette première approche du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had a permis de mettre en évidence la relation entre ce dépérissement et des facteurs tels que l'altitude, l'exposition et la pente. Ce phénomène a touché la cédraie vers sa limite inférieure altitudinale, aux expositions ensoleillées et sur les sols à forte pente. Ces facteurs sont considérés comme prédisposant le phénomène de dépérissement. L'analyse des paramètres dendrométriques montre que le dépérissement touche les sujets d'âges variés, mais que les arbres âgés sont plus touchés. Les arbres touchés dans la zone d'étude présentent un stade de dépérissement avancé, dans la mesure où les sujets morts sur pied, et ceux qui manifestent une défoliation importante, sont les plus fréquemment recensés. Les arbres dépéris se caractérisent aussi par une faible activité cambiale et une sensitivité au climat assez élevée par rapport aux arbres sains. Ces particularités écophysiologiques pourraient être expliquées par la variabilité individuelle entre arbres de la même population. La difficulté de la croissance chez les arbres dépéris s'aggrave après les années de sécheresse et conduit finalement à leur mortalité. Le déficit hydrique joue le rôle de facteur déclenchant et aggravant. D'autres facteurs peuvent aussi jouer un rôle dans l'apparition de ce phénomène, tels les agents pathogènes et les propriétés édaphiques des sols, ce qui souligne l'importance de mener en parallèle des études sur ce sujet. À cet égard, la mise en place d'un dispositif de surveillance et d'observation de la santé du cèdre est nécessaire pour une bonne gestion des peuplements.

Remerciements

Les auteurs remercient tous les cadres de la direction du Parc national de Theniet El Had pour l'assistance durant le travail de terrain, le Dr F. Dahlia pour l'analyse des données sous SPSS et trois relecteurs anonymes pour leurs remarques et critiques constructives. Ce travail rend hommage à feu Dr Mahand Messaoudene, directeur de recherche à l'Institut national de recherche forestière d'Algérie, initiateur des travaux sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Algérie.

Photo 3.
Aspect général du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans la zone d'étude. (A) Arbre isolé. (B) Tache isolée.
Photos M. Sarmoum.

Références bibliographiques

Abdelhamid D., Marniche F., Allal-Benfekih L., Benadjroud N., Mouna M., 2017. Importance des coléoptères sylvatiques associés au cèdre de l'Atlas au niveau du parc national de Theniet El Had (Algérie). Agrobiologia, X (X) : 297-311. http://agrobiologia.net/online/tag/cedre-de-latlas/

Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., *et al.*, 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. Forest Ecology and Managment, 259: 660-684. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001

Aoubouazza M., 2017. Influence des propriétés hydrodynamiques du sol sur la sensibilité au dépérissement du Cèdre dans le Causse moyen-atlasique central marocain. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 5 (3) : 293-303. https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAVH2/article/view/505

Becker M., 1987. Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Étude écologique et dendrochronologique. Annales des Sciences Forestières, 44 (4) : 379-402. https://doi.org/10.1051/forest:19870401

Bentouati A., Bariteau M., 2006. Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). Forêt Méditerranéenne, 27 (4) : 317-322. http://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue/id-1011-reflexions-sur-le-deperissement-du-cedre-de-l-atlas-des-aures-algerie-

Bonneau M., Landmann G., 1988. Le dépérissement des forêts en Europe : de quoi la forêt est-elle malade ? La Recherche, 19 (205) : 1542-1555.

Bouhot-Delduc L., Lévy A., 1994. Rôle de la chenille processionnaire du pin dans les dépérissements du Pin maritime landais en 1990 et 1991. Revue Forestière Française, 5 : 431-436. https://doi.org/10.4267/2042/26567

Camarero J. J., Bigler C., Linares J. C., Gil-Pelegrín E., 2011. Synergistic effects of past historical logging and drought on the decline of Pyrenean silver fir forests. Forest Ecology and Management, 262 : 759-769. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.009

D'Eon S. P., Magasi L. P., Lachance D., DesRochers P., 1995. DNARPA. Réseau national de surveillance de l'état des forêts au Canada : Guide d'établissement et de surveillance des parcelles. Chalk River (Ontario), Canada, Institut forestier national de Petawawa, Rapport d'information PI-X-117F, 99 p. https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=10847

Derak M., M'hirit O., Mouflih B., Et-Tobi M., 2008. Influence de la densité et du type de peuplement sur le dépérissement du Cèdre à Sidi M'Guild (Moyen Atlas marocain). Forêt Méditerranéenne, 29 : 23-32.

Fritts H. C., 1976. Tree-rings and Climate. London, United Kingdom, Academic Press, 534 p.

Fuhrer E., 1990. Forest decline in central Europe: Additional aspects of its cause. Forest Ecology and Management, 37: 249-257. https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90094-r

Gaba-Chahboub H., Lamhamedi M. S., Abrous-Belbachir O., 2016. Effet de l'inoculation ectomycorhizienne en pépinière sur la croissance et la nutrition des plants du cèdre de l'Atlas en Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 330 (4) : 57-67. https://doi.org/10.19182/bft2016.330.a31319

Gazol A., Ribas M., Gutierrez E., Camarero J., 2017. Aleppo pine forests from across Spain show drought-induced growth decline and partial recovery. Agricultural and Forest Meteorology, 232: 186-194. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.014

Hasnaoui F., Abbés C., Yakoubi W., Hasnaoui B.,

2006. État actuel du dépérissement du chêne-liège dans la zone de Kroumirie (Tunisie). Annales de l'INRGREF, 9 (1) : 167-185.

Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez 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 : 129-137. https://doi.org/10.1684/sec.2013.0384

Ladjal M., Delouche N., Huc R., Ducrey M., 2007. Effects of soil and air drought on growth, plant water status and leaf gas exchange in three Mediterranean cedar species: *Cedrus atlantica*, *C. brevifolia* and *C. libani*. Trees, 21: 201-211. https://doi.org/10.1007/s00468-006-0112-0

Landmann G., 1994. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. Revue Forestière Française, 5 : 405-416. https://doi.org/10.4267/2042/26563

Lanier L., Badré M., Delabraze P., Dubourdieu J., Flammarion J.-P., 1994. Précis de sylviculture. Nancy, France, ENGREF, 477 p.

Lebourgeois F., Lévy C., Becker M., Lefèvre Y., 1997. Rôle de la nutrition minérale et de l'approvisionnement en eau sur la croissance du pin laricio corse dans l'ouest de la France. Annales des Sciences Forestières, 54 : 279-300. https://doi.org/10.1051/forest:19970306

Linares J. C., Taïqui L., Sangüesa-Barreda G., Ignacio Seco J., Camarero J. J., 2013. Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. Dendrochronologia, 31: 88-96. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.003

Manion P. D., 1991. Tree Disease Concepts. 2nd edition. Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice Hall, 402 p.

Mattauer M., 1958. Étude géologique de l'Ouarsenis oriental (Algérie). Service de la Carte géologique de l'Algérie, Alger, 550 p.

Messaoudene M., Rabhi K., Megdoud A., Sarmoum M., Dahmani-Megrerouche M., 2013. État des lieux et perspectives des cédraies algériennes. Forêt Méditerranéenne, 34 : 1-8.

Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. Nancy, France, ENGREF, 328 p.

Quézel P., Médail F., 2003. Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Paris, France, Lavoisier, 576 p.

Rhanem M., 2011. Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc). Physio-Géo, 5 : 143-165. https://doi.org/10.4000/physio-geo.1983

Rondeux J., 1999. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique, Presses agronomiques de Gembloux, 520 p.

Rouault G., Candau J.-N., Lieutier F., Nageleisen L.-M., Martin J.-C., Warzée N., 2006. Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Annals of Forest Science, 63: 613-624. https://doi.org/10.1051/forest:2006044

Sari D., 1977. L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis (Algérie). Alger, Algérie, SNED, 628 p.

Sarmoum M., Guibal F., Abdoun F., 2016. Effet des facteurs stationnels sur la croissance radiale et la réponse du pin d'Alep au climat dans le massif de l'Ouarsenis, Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 329 (3) : 17-27. https://doi.org/10.19182/bft2016.329.a31308

Sarmoum M., Navarro-Cerrillo R. M., Guibal F., Abdoun F., 2018. Structure, Tree Growth and Dynamics of *Cedrus atlantica* Manetti Forests in Theniet El Had National Park (N-W Algeria). Open Journal of Ecology, 8: 432-446. https://doi.org/10.4236/oje.2018.88026

Sokal R. R., Rohlf F. J., 1995. Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. San Francisco, Ca, USA, W. H. Freeman and Company, 896 p.

Stokes M. A., Smiley T. L., 1968. An introduction to tree-ring dating. Chicago, Ill, USA, University of Chicago Press, 73 p.

Thomas A. L., Gégout J. C., Landmann G., Dambrine C., King D., 2002. Relation between ecological condition and fir decline in a standstone region of the Vosges montains (northeastern France). Annales des Sciences Forestières, 59 : 265-273. https://doi.org/10.1051/forest:2002022

Touchan R., Anchukaitis K. J., Meko D. M., Attalah S., Baisan C., Aloui A., 2008. Long term context for recent drought in northwestern Africa. Geographic Research Letters, 35. https://doi.org/10.1029/2008gl034264

Zaremski A., Bakkali-Yakhlef S., Chaintreuil C., Abbas Y., Prin Y., Abourouh M., *et al.*, 2007. Caractérisation moléculaire du M'Jej, agent de dépérissement des cédraies du Maroc. Bois et Forêts des Tropiques, 291 (1) : 67-73. https://doi.org/10.19182/bft2007.291.a20358

Zine El Abidine A., 2003. Le dépérissement des forêts au Maroc : analyse des causes et stratégie de lutte. Sécheresse, 14 (4) : 209-218. https://www.jle.com/fr/revues/sec/e-docs/le_deperissement_des_forets_au_maroc_analyse_des_causes_et_strategie_de_lutte__262885/article.phtml?tab=texte

Zine El Abidine A., Lamhamdi M. S., Taoufik A., 2014. Relations hydriques des arbres sains et dépérissants de *Cedrus atlantica* M. au Moyen Atlas Tabulaire au Maroc. Geo-Eco-Trop, 37 (2) : 157-176. https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Geo-Eco-Trop-37-2-157-176.pdf

Zimmermann J., Hauck M., Dulamsuren C., Leuschner C., 2015. Climate warming-related growth decline affects *Fagus sylvatica*, but not other broadleaved tree species in central European mixed forests. Ecosystems, 18: 560–572. https://doi.org/10.1007/s10021-015-9849-x

Sarmoum *et al.* – Contribution des auteurs

RÔLE DU CONTRIBUTEUR	NOMS DES AUTEURS
Conceptualisation	M. Sarmoum
Gestion des données	M. Sarmoum, R. Navarro-Cerrilo, F. Guibal
Analyse formelle	M. Sarmoum, R. Navarro-Cerrilo
Acquisition du financement	M. Sarmoum, R. Navarro-Cerrilo
Enquête et investigation	M. Sarmoum
Méthodologie	M. Sarmoum, R. Navarro-Cerrilo, F. Guibal
Gestion de projet	M. Sarmoum
Ressources	M. Sarmoum
Logiciels	R. Navarro-Cerrilo, F. Guibal
Supervision	M. Sarmoum
Validation	R. Navarro-Cerrilo, F. Guibal
Visualisation	M. Sarmoum, R. Navarro-Cerrilo
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	M. Sarmoum
Écriture – Révision et édition	M. Sarmoum, R. Navarro-Cerrilo, F. Guibal