

## Relations hydriques des arbres sains et dépérissants de *Cedrus atlantica* M. au Moyen Atlas Tabulaire au Maroc

### Water relations of healthy and declining trees of *Cedrus atlantica* M. in Tabular Middle Atlas in Morocco

Abdenbi ZINE EL ABIDINE<sup>1\*</sup>, Mohammed S. LAMHAMED<sup>2</sup> & Aadel TAOUFIK<sup>3</sup>

**Abstract :** To better understand ecophysiological basis of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica* M.) decline in Tabular Middle Atlas in Morocco, an experimental design was installed in two cedar forests to analyze, under different ecological and climatic conditions, some water relations parameters of healthy and declining trees.

Water relations parameters of Atlas Cedar trees were significantly related to changes in climate, habitats diversity, soil water availability, tree phenology and tree health. Visibly dying trees differ significantly from healthy trees by more negative predawn and midday water potentials and higher amplitude of daily water potential. These differences are more obvious when soil water content decreases. Trees on basaltic substratum were not visibly stressed contrary to those on limestone and dolomitic ones. Critical water potential is about -30 bars, indicating the Atlas cedar is an anisohydric species.

Results suggest the need to adopt a forest strategy for Middle Atlas cedar management based on appropriate silvicultural treatments and including a genetic selection program to identify genotypes adapted to environmental stress and prospective climate change. This would contribute to the rehabilitation of degraded cedar forests.

Key words: *Cedrus atlantica* M., Decline, Tabular Middle Atlas, Ecophysiology, Water relations.

**Résumé :** Pour mieux comprendre les fondements écophysologiques du dépérissement du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) au Moyen Atlas Tabulaire au Maroc, un dispositif expérimental a été installé dans deux cédraies pour analyser, sous différentes conditions écologiques et climatiques, quelques paramètres des relations hydriques des arbres sains et des arbres dépérissants.

Les paramètres des relations hydriques des arbres du cèdre sont liés significativement aux changements des conditions climatiques, à la diversité des habitats, à la disponibilité en eau des sols, à la phénologie des arbres et à leur état de santé. Les arbres visiblement dépérissants se sont démarqués significativement des arbres sains par un potentiel hydrique pré-aube et un potentiel hydrique de midi plus négatifs et une amplitude journalière du potentiel hydrique généralement plus élevée. Les différences entre arbres sains et dépérissants sont plus évidentes lorsque la teneur en eau des sols diminue. Les arbres sur substrat basaltique n'ont pas été visiblement stressés contrairement à ceux sur substrat calcaire et dolomitique. Le potentiel hydrique critique est de l'ordre de -30 bars indiquant le caractère anisohydrique du cèdre de l'Atlas.

Ces résultats montrent la nécessité d'adopter une stratégie pour l'aménagement des cédraies du Moyen Atlas basée sur l'application de traitements sylvicoles appropriés et d'intégrer un programme de sélection génétique pour l'identification de génotypes plus adaptés aux stress environnementaux et aux perspectives des changements climatiques pour la reconstitution des cédraies dégradées.

Mots clés : *Cedrus atlantica* M., Dépérissement, Moyen Atlas Tabulaire, Ecophysologie, Relations hydriques

## INTRODUCTION

Les forêts du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.), essence forestière noble du Maroc, occupent environ 145 000 ha, répartis dans le Moyen Atlas, le Haut Atlas Oriental, le Rif et le Massif de Tazekka principalement dans les ambiances climatiques humide et perhumide. Dans ces massifs montagneux, le Cèdre de l'Atlas constitue de nombreux écosystèmes forestiers qui se présentent sous

<sup>1</sup> Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs, BP 511, Bd : Moulay Youssef ; Tabriquet, Salé, Maroc ;

<sup>2</sup> Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles. 2700, rue Einstein. Québec, Canada G1P 3W8.

<sup>3</sup> Direction de la lutte contre la désertification et de la protection de la nature, HCEFLCD, Rabat, Maroc.

\* Correspondance : zineenfi@gmail.com

forme de peuplements purs ou en mélange avec le chêne vert (*Quercus rotundifolia* L.) qui recèlent une biodiversité très riche (M'HIRIT, 1982 ; BENABID, 2000). La cédraie marocaine assure un rôle multifonctionnel à la fois économique, écologique, environnemental et culturel (M'HIRIT, 1994 ; ANONYME, 1999). Cependant, ce patrimoine national est assujéti au phénomène de dépérissement (Figures 1a, b et 2) dont l'ampleur et la gravité ont suscité la réaction des autorités administratives, des chercheurs et des pouvoirs publics, ainsi que certaines organisations internationales de développement (ZINE EL ABIDINE, 2003 ; ZINE EL ABIDINE & ABOULABBESS, 2004 ; GILLIAN, 2005 ; ANONYME, 2007).

Le dépérissement du cèdre de l'Atlas a été signalé au début dans les cédraies marginales situées dans le Haut Atlas et le Moyen Atlas oriental exposées à des conditions extrêmes de sécheresse. Au Moyen Atlas Tabulaire, il a été constaté durant les sécheresses sévères des années 1940. Mais, à partir des années 1990 pendant lesquelles les fréquences de sécheresse ont augmenté, ce phénomène s'est manifesté d'une manière plus étendue notamment dans les cédraies qui se développent sur substrats calcaire, calcaire dolomitique et dolomie sableuse (ET-TOBI, 2006). Le dépérissement du cèdre a été aussi signalé en Algérie (BENTOUATI, 2008) et même dans des plantations de cèdre de l'Atlas en France (NIERDERLENDER, 2009). Cependant, le dépérissement du cèdre au Moyen Atlas n'est pas généralisé, mais se distingue par une variabilité temporelle et spatiale très prononcée entre les individus à l'échelle du peuplement (Figure 2).



**Figure 1. a :** Cèdres de l'Atlas au début du premier stade de dépérissement

**Figure 1. b :** Cèdres de l'Atlas au stade avancé de dépérissement

Région de Michlifén au Moyen Atlas central sur substrat calcaire (Photos Lamhamedi).

**Figure 2. :** Variabilité du dépérissement du Cèdre de l'Atlas au sein d'une forêt mixte « Cèdre-Chêne vert » dans le Moyen Atlas central sur substrat calcaire ; Région de Michlifén (Photo Lamhamedi).

Le dépérissement des forêts est devenu un phénomène planétaire complexe dont l'origine est à rechercher dans l'interaction de plusieurs stress environnementaux sévères qui affectent négativement la santé des arbres conduisant souvent à leur mortalité (LANDMANN, 1994). À cet effet, les sécheresses épisodiques et récurrentes prolongées associées à des hautes températures figurent parmi les principaux facteurs responsables de l'affaiblissement physiologique des arbres et de l'augmentation de leur vulnérabilité aux autres processus physiologiques de dépérissement (MCDOWELL *et al.*, 2008 ; ADAMS *et al.*, 2010 ; ALLEN *et al.*, 2010 ; CHOAT *et al.*, 2012). À cet égard, le phénomène de dépérissement du Cèdre de l'Atlas s'est amplifié à la suite des sécheresses répétées qu'a connues le Maroc à partir des années 1980 (ZINE EL ABIDINE, 2003 ; ANONYME, 2007). En effet les sécheresses prolongées combinées à l'absence d'une sylviculture appropriée, permettant d'équilibrer la densité et la structure des peuplements forestiers aux disponibilités hydriques des sols et aux conditions écologiques des habitats, seraient à l'origine du dysfonctionnement des peuplements et du dépérissement du cèdre (AUSSENAC, 2000 ; BREDA *et al.*, 2004 ; BREDA *et al.*, 2006).

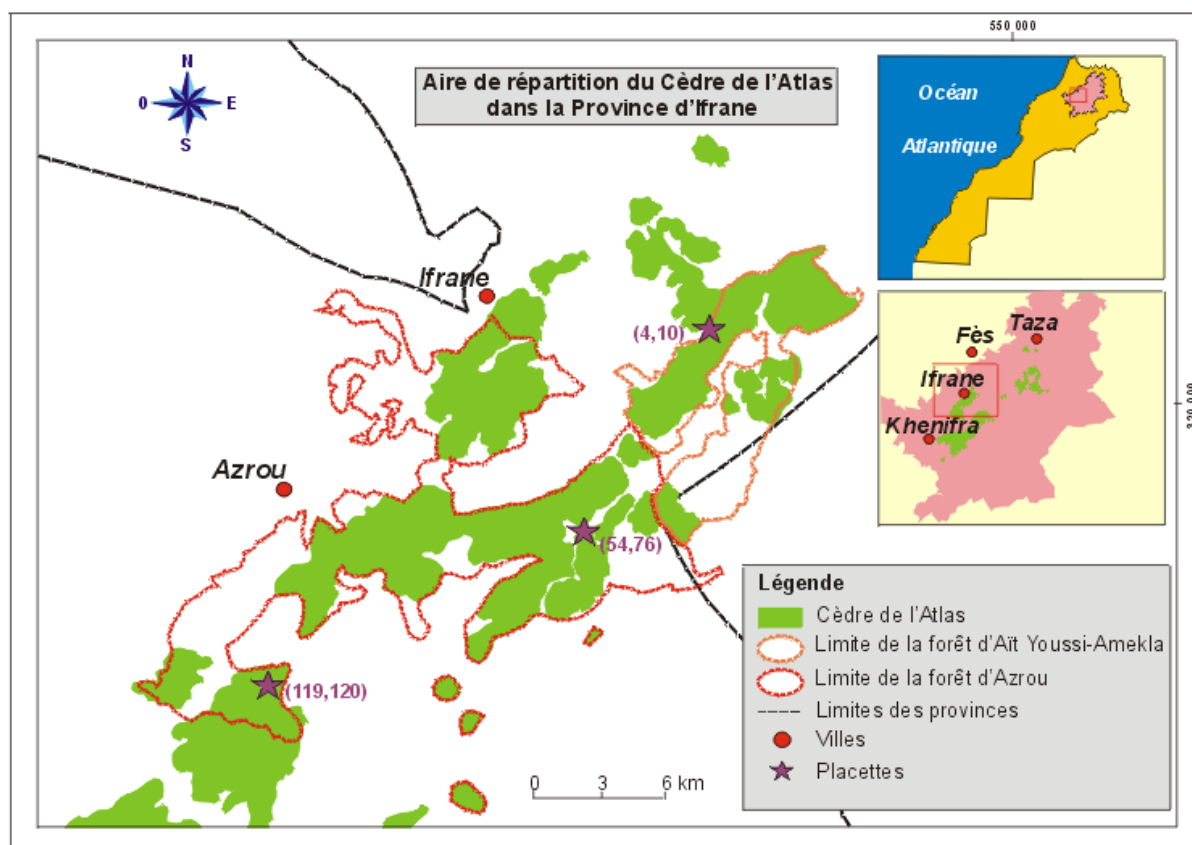
Différents travaux de recherche réalisés au Maroc, basés essentiellement sur les approches écologiques et sylvicoles, ont tenté de diagnostiquer ce phénomène, mais sans arriver à expliquer les

causes réelles du déclenchement et de l'expansion du dépérissement du Cèdre de l'Atlas (OU-TAHAR, 1994 ; DERAK, 2003 ; ABOUELASAOUAD, 2005 ; ACHEHBOUNE, 2006 ; ET-TOBI, 2006). En outre, nos connaissances sont très limitées, jusqu'à présent, quant à la compréhension des processus écophysologiques, notamment ceux reliés à l'évolution des relations hydriques, à l'échelle du peuplement, aussi bien des arbres sains que dépérissants ; la majorité des travaux ayant mis l'accent sur la compréhension des processus écophysologiques (relations hydriques, échanges gazeux, tolérance à la sécheresse, etc.) ont utilisé des plants forestiers très jeunes dont l'âge ne dépasse pas deux ans (AUSSENAC & FINKEISTEIN, 1983 ; LADJAL *et al.*, 2000 ; TAOUIK, 2006). L'évaluation des relations hydriques des arbres matures du Cèdre de l'Atlas, sous conditions naturelles, contribuerait à la fois à approfondir les connaissances sur la physiologie de l'espèce à l'état naturel, à mieux cerner les limites de sa tolérance vis-à-vis le stress hydrique et à mieux appréhender le processus de dépérissement (KOZLOWSKI *et al.*, 1991 ; BREDA *et al.*, 2006).

L'analyse de ce phénomène selon l'approche écophysologique, complémentaire aux autres travaux antérieurs (OU-TAHAR, 1994 ; DERAK, 2003 ; ABOUELASAOUED, 2005 ; HBOUNE, 2006 ; ET-TOBI, 2006 ; ANONYME, 2007) permettrait d'obtenir des informations précieuses pouvant expliquer le comportement du cèdre, ainsi que les mécanismes qui seraient liés à son dépérissement (ZINE EL ABIDINE *et al.*, 1997 ; LADJAL *et al.*, 2000 ; ZINE EL ABIDINE, 2003 ; BREDA *et al.*, 2006). La connaissance de ces causes est très importante pour la gestion et le développement des cédraies à l'état actuel et dans le contexte des changements climatiques (AUSSENAC, 2002 ; DEMARTEAU *et al.*, 2007 ; KUPARINEN *et al.*, 2010).

Les objectifs de ce travail consistent à :

1. Analyser les relations hydriques des arbres de cèdre sains et dépérissants dans deux cédraies du Moyen Atlas Tabulaire en relation avec les caractéristiques écologiques des stations, les types de peuplements et l'état phénologique des arbres ;
2. Elaborer des recommandations à caractère opérationnel dont l'objectif est de contribuer à assurer la pérennité du cèdre de l'Atlas et le fonctionnement de ses écosystèmes en réponse aux changements climatiques actuels et futurs.



**Figure 3 :** Localisation de la zone d'étude au Moyen Atlas (Maroc) et des placettes échantillonnées (★)

## MATERIEL ET METHODES

### Dispositif expérimental

La zone concernée par cette étude est constituée de deux massifs forestiers naturels : la forêt d'Azrou et la forêt d'Ait Youssi Amekla qui relèvent, administrativement, de la Direction provinciale des eaux et forêts d'Ifrane (Direction Régionale des Eaux et Forêts du Moyen Atlas, Mèknes, Maroc). Les deux massifs forestiers sont situés au Sud Est des villes d'Ifrane et Azrou dans le Moyen Atlas Tabulaire. Ils s'étendent respectivement sur une superficie boisée de 13763,02 ha et 5736,16 ha (ANONYME, 2006). Dans ces massifs, le cèdre représente l'essence principale et forme, selon la nature du substrat, des peuplements purs ou en mélange avec le chêne vert (Figure 3).

### Mesure des paramètres du potentiel hydrique des arbres du Cèdre de l'Atlas et du statut hydrique des sols forestiers

Outre la teneur en eau (absolue, pondérale ou relative), le statut hydrique des plantes peut être déterminé par la mesure du potentiel hydrique ( $\square_w$ ) qui reflète l'état énergétique de l'eau des tissus de la plante, déterminé par la somme de deux principales composantes : le potentiel de pression ( $\square_p$  : pression hydrostatique exercée par la paroi cellulaire) et le potentiel osmotique ou de soluté ( $\square_s$  : du à la concentration des solutés intracellulaires).

Le potentiel hydrique exprime l'énergie potentielle spécifique de l'eau relative à celle de l'eau dans un système de référence « eau libre et pure » dont le potentiel hydrique est nul. Dans une plante non saturée qui est déficitaire sur le plan hydrique, l'eau n'est pas libre. Son potentiel hydrique est plus négatif à celui de l'état de référence. L'eau se déplace toujours, au sein du continuum « Sol-Plante-Atmosphère » dans le sens d'un gradient décroissant du potentiel hydrique. Un potentiel hydrique plus négatif indique un déficit hydrique plus important (HINCKLEY *et al.*, 1978 ; KRAMER, 1983 ; CRUIZIAT & TYREE, 1990 ; KOZLOWSKI *et al.*, 1991).

Les relations hydriques des arbres échantillons ont été analysées à l'aide des paramètres du potentiel hydrique du xylème incluant le potentiel hydrique de base (pré-aube) mesuré avant le lever du soleil (PHB), le potentiel hydrique de midi (PHM) mesuré entre 12h00 et 14h00 et l'Amplitude Journalière du Potentiel Hydrique (AJPH), avec (AJPH = PHB – PHM). Le PHB et le PHM indiquent respectivement l'état d'équilibre des plantes avec la teneur en eau du sol et la demande évapotranspiratoire de l'air. L'AJPH est un indicateur indirect de l'intensité des échanges gazeux des plantes ; elle diminue lorsque la demande évapotranspiratoire de l'air est faible et/ou le déficit hydrique du sol est accentué (AUSSENAC & GRANIER, 1978 ; HINCKLEY & *al.*, 1978 ; ZINE EL ABIDINE *et al.*, 1995).

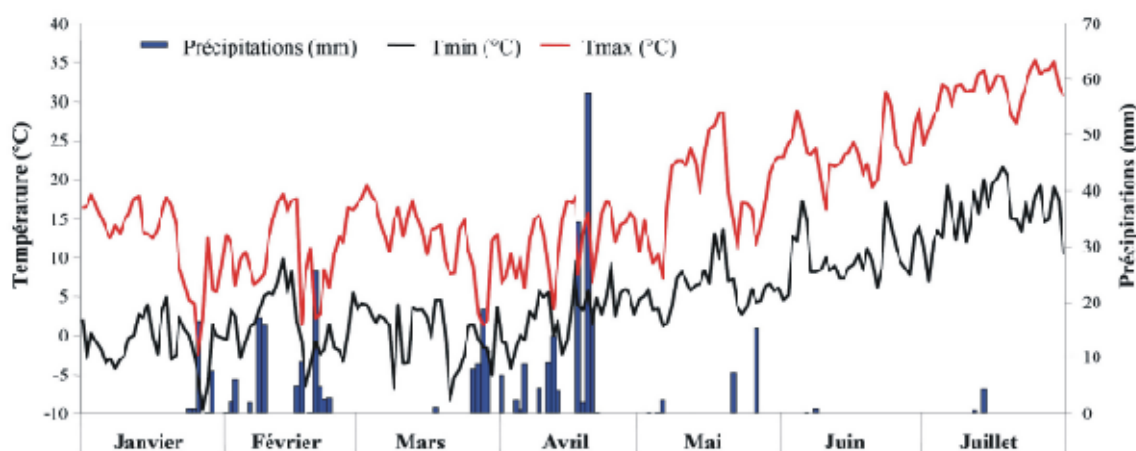
Les valeurs du PHB et de l'AJPH ont servi aussi à déterminer le potentiel hydrique critique (PHC) qui correspond au potentiel hydrique de base (pré-aube) le plus négatif associé à un arrêt quasi complet des échanges gazeux indiqué par une faible AJPH (AUSSENAC & GRANIER, 1978). Ces auteurs ont proposé que le potentiel hydrique de base critique soit associé à une valeur de 4 bars pour l'amplitude journalière du potentiel hydrique (AJPH) pour une belle journée ensoleillée. Mais, nous pensons qu'il est plus évident de définir le potentiel hydrique critique par rapport à la fermeture complète des stomates indiquée par une valeur nulle du AJPH. La technique des courbes limites permet de situer le potentiel hydrique critique sur le nuage des points qui résulte de la projection des valeurs du PHB et de l'AJPH (ZINE EL ABIDINE *et al.*, 1997).

Eu égard à la spécificité de l'approche écophysiological, les mesures ont été réalisées dans six placettes dont quatre sont situées dans la forêt d'Azrou (54, 76, 119, 120) et deux dans la forêt de Ait Youssi (4, 10). Ces placettes font partie d'un réseau de 54 placettes ayant servi à d'autres recherches sur les aspects de dépérissement du cèdre dans les deux forêts (ANONYME, 2007) ; elles représentent la diversité écologique des peuplements de cèdre des deux forêts. Une description succincte des placettes échantillons a été notée précisant la vigueur des arbres, l'altitude, l'exposition, le substrat, la situation topographique, le type de sol et le type de peuplement. Toutes les placettes se situent à des altitudes qui varient entre 1800 m et 2050 m. Les placettes 119 et 120 sont sises sur substrat basaltique, les autres sur substrat calcaire, dolomie calcaire et dolomie sableuse. Les deux premières

placettes représentent les peuplements purs de cèdre alors que les autres sont des forêts mixtes de cèdre et de chêne vert (*Quercus rotundifolia* L.).

Dans chaque placette, trois arbres sains et trois arbres dépérissants ont été numérotés et repérés à l'aide de peinture. La distinction entre arbre sain et arbre dépérissant a été basée sur la vigueur des arbres, la densité des aiguilles, leur couleur et le dessèchement des branches. Les arbres visiblement dépérissants se caractérisent par des aiguilles moins denses, présentant une perte foliaire variant de 25 à 75 %, une couleur verte jaunâtre et un dessèchement partiel, notamment celui du tiers supérieur de la cime. Les placettes 4 et 10 sont plus affectées par le dépérissement. À l'inverse, les placettes 119 et 120 sur substrat basaltique présentent peu d'arbres dépérissants. La moyenne des hauteurs et des diamètres des arbres échantillonnés sont respectivement de 17,43 m et 1,45 m.

Les mesures ont été effectuées à quatre reprises en mars, mai, juin et juillet 2007 (printemps et début de l'été) dans le but de tenir compte de la variation mensuelle et saisonnière des conditions climatiques dans la zone d'étude et du développement phénologique des arbres. A chaque période de mesure, des observations qualitatives liées à la phénologie et la vigueur des arbres de cèdre ont été notées, de même que les conditions climatiques (Figure 4).



**Figure 4 :** Variation des précipitations et des températures durant la période d'échantillonnage (mars, mai, juin et juillet 2007).

Lors des deux premières dates d'échantillonnage en mars et en avril, la température minimale était inférieure à 3°C, alors que la température maximale ne dépassait guère 15°C. Les précipitations étaient très faibles en mars, mais plus importantes en avril. Les mois de juin et juillet étaient plus secs. Le débourrement des bourgeons du cèdre de l'Atlas a commencé au début du mois de mai et paraît plus précoce au niveau des arbres des placettes de la forêt d'Azrou sur substrat basaltique. L'élongation des pousses de l'année s'est poursuivie en juin, mais elle s'est ralentie nettement en juillet 2007. Les arbres sains et ceux dépérissants n'ont pas montré de différences dans l'importance et la dynamique du débourrement. En général, la croissance active du cèdre au Moyen Atlas s'est étalée, en moyenne, sur 2,5 mois environ, mais cette période semble plus longue chez les arbres situés sur le versant atlantique plus humide, et plus courte, en allant vers l'est, sur les versants moins mésophiles comme dans la région de Michlifén à l'est d'Ifrane où les températures sont plus froides et les sols sont moins humides et plus froids.

Les mesures des paramètres du potentiel hydrique ont été effectuées sur 36 arbres échantillonnés (18 arbres sains et 18 arbres dépérissants), à raison de deux échantillons par arbre. Des petites branches de 10 à 20 cm ont été prélevées, à l'aide d'un sécateur télescopique, à une hauteur de 6 à 8 m en fonction de la disponibilité des branches les plus proches. Deux échantillons de situations opposées ont été prélevés sur chaque arbre pour tenir compte de la variabilité de l'état hydrique et de l'architecture hydraulique des arbres (HINCKLEY *et al.*, 1978). Les échantillons ont été rapidement mis en sac de plastique et gardés au froid dans une glacière. Ces dispositions permettent de conserver l'état hydrique des échantillons et d'éviter la transpiration au cours du transport jusqu'au laboratoire à Ifrane, situé à une distance de 10 km environ. Au total, 144 (36 arbres x 2 x 2) échantillons ont été

mesurés à chaque échantillonnage. Les mesures du potentiel hydrique ont été faites sur des segments de branches (des scions) de 5 à 10 cm à l'aide de la chambre à pression (P.M.S. Instruments, Corvallis, Oregon, États-Unis) selon l'approche décrite par ZINE EL ABIDINE (1993).

En vue de déterminer les relations entre l'état hydrique des arbres et celle du sol, des mesures de la teneur en eau des sols ont été réalisées, les mêmes jours, à raison de trois échantillons de sol par placette aux alentours des arbres échantillonnés pour la mesure du potentiel hydrique. Les échantillons ont été prélevés à l'aide de la tarière dans la zone racinaire, soit à une profondeur variant entre 30 à 50 cm, selon les types de sol des placettes. Cette profondeur correspond généralement à la principale zone racinaire exploitée par les arbres de cèdre dont l'enracinement est majoritairement traçant et superficiel. Au total, 18 échantillons (3 échantillons x 6 placettes) ont été prélevés à chaque échantillonnage.

La masse fraîche (MF) des échantillons de sols a été immédiatement déterminée sur le terrain en utilisant une balance de terrain (Modèle OHAUS LS 2000, Précision 0.01g). La masse sèche (MS) a été mesurée après séchage à 65°C pendant 48 heures dans une étuve. La teneur en eau relative (TES) du sol a été calculée selon la formule suivante :

$$TES(\%) = \frac{(MF - MS)}{MS} \times 100$$

## Analyses statistiques

Les données obtenues tout au long de la période d'échantillonnage ont permis d'analyser la cinétique des paramètres du potentiel hydrique des arbres en relation avec l'évolution de la teneur en eau du sol (TES), celle des conditions climatiques et selon la date d'échantillonnage (D), les placettes (P) et la vigueur des arbres (V). Ces données ont été analysées en adoptant les approches graphiques et les procédures des analyses statistiques à l'aide de l'analyse de variance ANOVA. Deux analyses de variance ont été opérées, à l'aide du logiciel SPSS, l'une avec l'ensemble des données de toutes les placettes (6) et l'autre sans les données des placettes 119 et 120 où les arbres dépérissants sont très rares. Les données de la teneur en eau relative du sol ont également été analysées selon les mêmes procédures. Les différences entre les valeurs comparées ont été jugées significatives au seuil de 5% ( $p \leq 0,05$ ). La comparaison entre les moyennes des placettes et des dates d'échantillonnage a été réalisée à l'aide du test de S.N.K ; celle des arbres sains et dépérissants, par contrastes simples (STEEL & TORRIE, 1980).

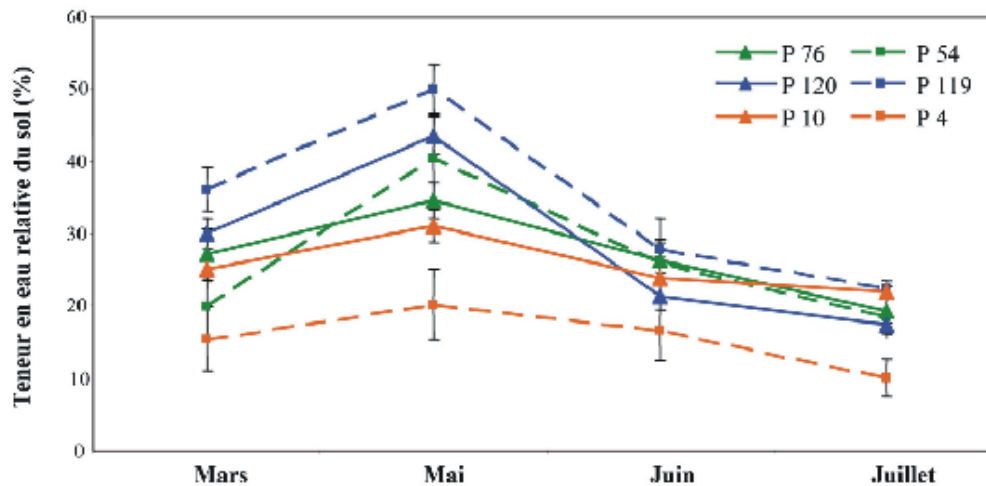
## RESULTATS ET DISCUSSION

### Teneur en eau du sol

La teneur en eau des sols (TES) des placettes échantillonnées a varié significativement selon les dates d'échantillonnage (D) et les placettes (P) ( $p < 0,01$ ). L'interaction (DxP) n'est pas significative ( $p > 0,05$ ). La TES a varié entre 15,39% et 36,04% en mars, entre 20,16% et 49,83% en mai, entre 16,57% et 27,65% en juin et entre 10,02 et 22,44% en juillet 2007. En moyenne, les valeurs les plus élevées ont été observées dans la placette 119 sur basalte dans la forêt d'Azrou. Les valeurs les plus faibles de la TES ont été observées dans la placette 04 sur sable dolomitique située dans la forêt d'Ait Youssi. Les sols des placettes sur substrat calcaire avec un taux d'argile élevé ont présenté une TES intermédiaire (Figure 5).

La TES déterminée en mai était plus élevée que celle déterminée respectivement en juin, mars et juillet 2007. En juillet, la TES a été la plus faible. Les pluies survenues en avril 2007 (Figure 4) ont amélioré significativement la teneur en eau des sols après l'échantillonnage de mars réalisé suite à une période de sécheresse assez longue d'environ deux mois (Figure 5).





**Figure 5 :** Teneur en eau relative des sols (%) par placette et par date d'échantillonnage. La placette P4 sur calcaire dolomitique, P10, P54 et P76 sur calcaire, P119 et P120 sur basalte. Chaque valeur est la moyenne de trois répétitions. Les barres représentent l'écart type des moyennes.

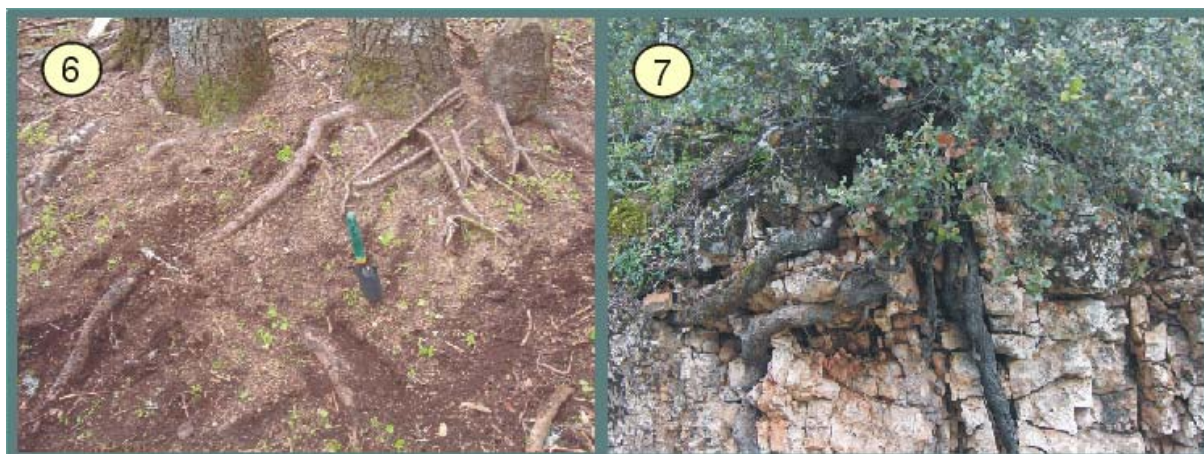
Les valeurs de la TES mesurées dans les différentes placettes se situent largement entre l'humidité équivalente (capacité au champ estimée) et le point de flétrissement temporaire déterminé au laboratoire pour les mêmes types de sol (TAOUFIK, 2006). Même en mi-juillet, les sols n'ont pas présenté des teneurs en eau très faibles. Mais, à partir de fin juillet, la TES devrait tendre vers des niveaux plus proches du point de flétrissement temporaire, ce qui créerait des conditions difficiles pour le développement du cèdre et son comportement écophysologique. Durant l'été et l'automne, le déficit hydrique est plus accentué. Les difficultés physiologiques créées, au sein des arbres, par le déficit hydrique des sols sont généralement amplifiées par le déficit hygrométrique de l'air qui est souvent accusé par l'avènement du chergui, un vent sec et chaud qui souffle de l'Est fréquemment pendant cette période. Mais, les orages qui sont fréquents en été, dans cette région du Moyen Atlas, permettraient d'atténuer le déficit hydrique des sols et de l'air et aideraient le Cèdre de l'Atlas à se prémunir contre le stress hydrique estival et l'augmentation excessive de la température. Cependant, cette opportunité très bénéfique pour le cèdre n'est pas générale pour toutes les forêts du Moyen Atlas, car les orages sont souvent localisés et éphémères, ne permettant pas un apport général substantiel de l'eau aux sols en cette période difficile, sauf lorsque les précipitations sont assez importantes.

A ce réchauffement saisonnier, il faut ajouter aussi la tendance générale de réchauffement du climat au Moyen Atlas et la diminution sensible de l'importance des précipitations pluvieuses et neigeuses. Ces difficultés sont accentuées aussi par les caractéristiques physiques des sols dont la plupart sont peu profonds à superficiels, contenant un taux de sable important et développés souvent sur des terrains en pente (ANONYME, 2007).

La résultante des effets de tous ces facteurs écologiques défavorables créent des conditions difficiles pour le développement du cèdre dont la gravité est fortement accentuée par la récurrence des années sèches et par la conjoncture des conditions stationnelles locales défavorables telles que les expositions chaudes, les pentes fortes, la présence des cailloux et roches dans les sols etc. (AUSSENAC, 1993 ; ZINE EL ABIDINE, 2003 ; ANONYME, 2007 ; TOUCHAN *et al.*, 2011, FAN *et al.*, 2012). Face à ces difficultés, le cèdre de l'Atlas et contrairement au Chêne vert (Figure 6), ne dispose pas d'un système racinaire profond (Figure 7) qui lui permet d'explorer suffisamment les couches des sols à la recherche de l'eau contenue dans les horizons profonds.

### Paramètres du potentiel hydrique

Les paramètres du potentiel hydrique du cèdre, incluant le potentiel hydrique de base (PHB), le potentiel hydrique de midi (PHM) et l'amplitude journalière du potentiel hydrique (AJPH) ont varié significativement en fonction des placettes et des dates d'échantillonnage ( $p < 0,01$ ).



**Figure 6 :** Développement du système racinaire du cèdre de l'Atlas dans les couches superficielles des sols (Photo : Zine El Abidine).

**Figure 7 :** Développement du système racinaire du chêne vert en profondeur même dans des roches calcaires (Photo : Zine El Abidine).

L'effet vigueur des arbres a été significatif ( $p < 0,01$ ) pour le PHB et le PHM dans le cas de l'analyse partielle qui a concerné uniquement les arbres des placettes sur substrats calcaire et dolomitique (P4, P10, P54 et P76). Le PHM a permis de mieux séparer les arbres sains de ceux dépérissants, notamment en mars et en juin (Figures 8 et 9). L'effet placette a été significatif pour les trois paramètres du potentiel hydrique ( $p < 0,01$ ). Les interactions doubles (DxP) et (PxV) ont été respectivement significatives pour les trois paramètres (PHB, PHM et AJPH) et pour le PHM ( $p < 0,01$ ). L'interaction triple (DxPxV) a été significative seulement pour le PHB et l'AJPH ( $p < 0,01$ ). Ces interactions traduisent les variations du comportement écophysologique du cèdre dues à l'évolution des conditions climatiques, à la phénologie des arbres et aux conditions écologiques des placettes.

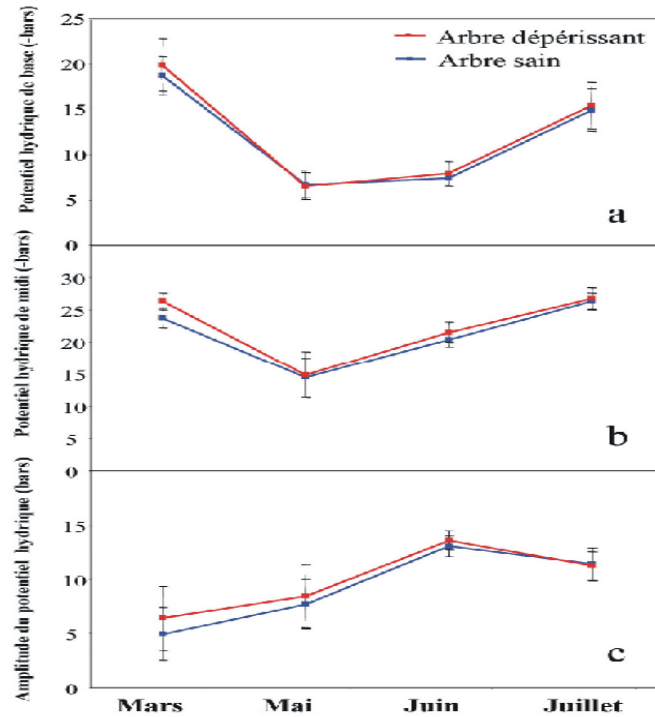
### Potentiel hydrique de base

Le potentiel hydrique de base (PHB) a enregistré des valeurs assez négatives en mars variant entre -14,75 bars et -27,75 bars respectivement des arbres des placettes 119 et 10 des forêts d'Azrou et d'Ait Youssi. Les mesures prises pendant le mois de mars ont été effectuées après une période de sécheresse d'environ deux mois qui s'est étalée sur les mois de janvier, février et mars 2007 (Figure 4). En moyenne, tous les arbres ont présenté un déficit hydrique à l'état d'équilibre avec le sol, ce qui montre que la teneur en eau des sols a été relativement faible (Figure 5). Ce déficit hydrique observé chez les arbres en mars 2007 est dû à l'état hydrique des sols assez secs, mais il peut aussi résulter du caractère adaptatif du cèdre de l'Atlas aux conditions du froid hivernal de la montagne qui subsiste encore en mars. En effet, les arbres forestiers des zones froides et très froides réduisent leur teneur en eau afin d'éviter l'effet du gel d'eau au niveau des vacuoles des cellules dont les effets seraient dangereux pour leur survie (KRAMER, 1983 ; KOZLOWSKI *et al.*, 1991). Cependant cette adaptation physiologique prédispose les arbres au stress hydrique dans le cas où les précipitations ne surviendraient pas, après le froid, soit le reste du printemps et le début de l'été. Ces faibles valeurs du PHB au début du printemps pourraient être dues aussi en grande partie à l'activité faible des racines.

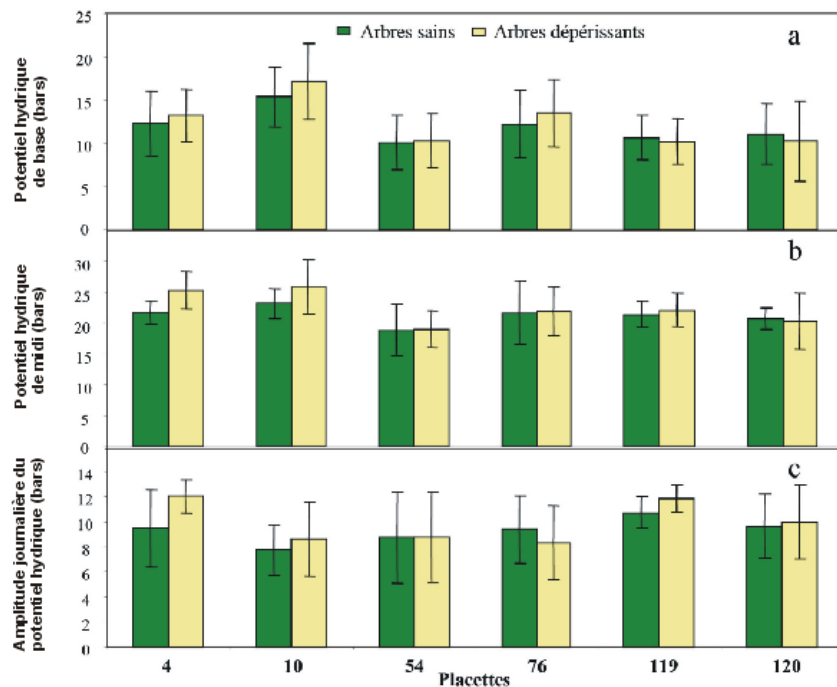
En effet, au début du printemps les températures du sol (0-30 cm) ne sont pas encore optimales à l'initiation et à la croissance de nouvelles racines qui assurent l'absorption d'eau. De plus, à cause de l'ombrage des arbres adultes, la pénétration de la lumière est fortement affectée par la densité des arbres, ce qui peut retarder l'atteinte de températures optimales (18-23°C) dans le premier horizon de sol. De plus, les températures faibles affectent négativement la viscosité de l'eau et son absorption par les racines (LAMHAMEDI & BERNIER, 1994 ; FINER *et al.*, 2011).

En général, les arbres dépérissants ont présenté des valeurs plus négatives du potentiel hydrique de base, ce qui montre qu'ils ont été plus stressés que les arbres sains. Les arbres les plus





**Figure 8 :** Variation du potentiel hydrique de base moyen (A), du potentiel hydrique de midi moyen (B) et de l'amplitude moyenne du potentiel hydrique (C) des arbres sains et des arbres dépérissants par date d'échantillonnage (2007). Chaque valeur est la moyenne des six placettes. Les barres représentent l'écart type des moyennes. Le potentiel hydrique traduit l'état énergétique de l'eau dans les tissus de la plante. Un potentiel hydrique plus négatif indique un déficit hydrique plus important.



**Figure 9 :** Variation du potentiel hydrique de base moyen (a), du potentiel hydrique de midi moyen(b) et de l'amplitude moyenne du potentiel hydrique (c) des arbres sains et des arbres dépérissants par placette. Chaque point représente la moyenne des quatre dates d'échantillonnage. Les barres représentent l'écart type des moyennes. Le potentiel hydrique traduit l'état énergétique de l'eau dans les tissus de la plante. Un potentiel hydrique plus négatif indique un déficit hydrique plus important.

stressés sont ceux de la placette 10 de la forêt d'Ait Youssi sur substrat calcaire. Les arbres les moins stressés sont ceux de la placette 119 située dans la forêt d'Azrou sur substrat basaltique (Figure 9). Les valeurs du PHB obtenues en mai et juin ont été moins négatives que celles enregistrées en mars. En général, les valeurs sont supérieures à -10 bars. Ces valeurs montrent que les arbres de cèdre ont réagi rapidement aux précipitations et aux chutes de neige survenues notamment en avril (Figure 4). Le mois de mai a aussi connu des précipitations orageuses assez abondantes. Les valeurs les plus négatives ont été observées chez les arbres dépérissants de la placette 10, avec respectivement -10,5 bars en mai et -11,17 bars en juin. Les arbres des placettes 119 et 120 sur substrat basaltique ont présenté les valeurs les moins négatives, supérieures à -7 bars.

En juillet, le PHB a enregistré des valeurs plus négatives à celles enregistrées en mai et juin, atteignant presque -20 bars. Les arbres dépérissants ont présenté en moyenne les valeurs les plus négatives (Figure 9). Les arbres des placettes 119 et 120 ont atteint des valeurs moins négatives ne dépassant pas -15 bars. Les arbres dépérissants de la placette 04 de la forêt d'Ait Youssi ont présenté les valeurs la plus négative soit -19,58 bars, contrairement aux arbres sains qui ont enregistré une moyenne de -12,08 bars. Les placettes 76 et 10 ont aussi présenté des valeurs assez négatives chez les arbres sains et les arbres dépérissants entre -19 bars et -20 bars.

Les données obtenues en juillet montrent que les arbres de Cèdre de l'Atlas présentent en général un stress hydrique plus prononcé chez les arbres dépérissants et moins apparent chez tous les arbres des placettes 119 et 120 sur substrat basaltique. Ce stress hydrique est associé à l'assèchement des sols dont la teneur en eau a significativement diminué par rapport à celle enregistrée en mai et juin (Figure 5), et à l'augmentation des températures maximales au milieu de la journée (Figure 4). Le mois de juillet a aussi connu les premières vagues du vent de l'est « Chergui », un vent sec et chaud. Ce stress pourrait également être associé au faible développement de nouvelles racines dont la croissance est intimement liée aux produits de la photosynthèse courante (LAMHAMEDI & BERNIER, 1994 ; FINER *et al.*, 2011). À cet égard, les arbres dépérissants peuvent généralement présenter une faible biomasse foliaire et une photosynthèse globale également faible à l'échelle de l'arbre par comparaison aux arbres sains.

Par ailleurs, il est à signaler que les valeurs du PHB des arbres de la placette 54, observées en juillet, n'ont pas dépassé la valeur de -12 bars. Cette valeur moins négative est probablement due aux pluies orageuses qui sont survenues la veille des mesures des arbres de cette placette. Ces pluies ont certainement pu améliorer l'état hydrique des arbres suite, probablement, à l'augmentation de la teneur en eau du sol et son effet direct sur l'amélioration de la quantité d'eau absorbée par les racines et également par l'absorption directe par les aiguilles au cours de la nuit. Mais, cette hypothèse mérite d'être étudiée. En effet, une amélioration par l'humidité atmosphérique de la teneur en eau de l'ordre de 6% a été mesurée sur des aiguilles de *Sequoia sempervirens* se développant dans des zones à forte humidité de l'air (BURGESS & DAWSON, 2004). Des observations similaires ont été notées sur l'effet du brouillard sur l'amélioration du statut hydrique de six espèces forestières tropicales au Costa Rica (GOLDSMITH *et al.*, 2012). Cependant, cette observation n'a pu être émise au sujet des arbres de la placette 76 située plus à l'est de la placette 54 qui est lointaine de 1,5 km environ et qui ont été mesurés la même matinée (au voisinage de la station radar de Michlifén), qui n'ont probablement pas profité des pluies orageuses déversées sur la placette 54 la même nuit. Les couches superficielles du sol au niveau de cette dernière placette ont été relativement humides le matin à l'aube, alors que le sol au niveau de la placette 76 a été sec. Cette remarque montre le caractère très local des orages et peut expliquer les différences de l'état physiologique observé en été entre les peuplements forestiers du Moyen Atlas selon leur localisation.

Ces résultats laissent présager que le cèdre réagit rapidement aux fluctuations rapides des teneurs en eau du sol grâce, probablement, à l'efficacité de son système racinaire qui se développe principalement dans les couches supérieures des sols sur une profondeur de 20 à 50 cm (Figure 4). Ce comportement pourrait être favorisée aussi par la transpiration qui crée la force de succion nécessaire à l'absorption de l'eau par les racines (HINCKLEY & *al.*, 1978). Le Cèdre de l'Atlas, contrairement aux sapins, peut transpirer jusqu'à des niveaux inférieurs de potentiel hydrique de base atteignant des valeurs plus faibles que -30 bars (AUSSENAC & GRANIER, 1978 ; DUCREY, 1994 ; TAOUFIK, 2006 ; LADJAL *et al.* 2005).

Durant toute la période des mesures, les arbres des placettes 4, 76 et 10 ont présenté des valeurs plus négatives que -10 bars, alors que ceux des placettes 54, 120 et 119 ont présenté les valeurs les moins négatives. Cette diversité de comportement écophysologique entre les arbres des placettes confirme l'effet des conditions stationnelles locales (caractéristiques des sols, situation topographique etc.) qui modifient largement l'effet des conditions climatiques générales, et peut indiquer aussi l'existence d'une variabilité génétique très prononcée qui pourrait exister entre les individus (clones) à l'échelle de la même placette (NEWTON *et al.*, 1986 ; FAN *et al.* 2012).

### **Potentiel hydrique de midi**

Le potentiel hydrique de midi (PHM) a enregistré des valeurs assez négatives en mars variant entre -20,83 bars et -28,75 bars (Figure 8). Ces valeurs, montrent que les arbres de toutes les placettes ont été relativement stressés. Les valeurs les plus négatives ont été observées chez les arbres dépérissants des placettes 4 et 10 situées dans la forêt d'Ait Youssi. Ce comportement montre aussi que les arbres dépérissants ont été plus stressés au milieu de la journée que les autres arbres (Figure 9). Ces valeurs négatives de potentiel hydrique de la mi-journée pourraient indiquer que la phase active de croissance de nouvelles racines blanches n'a pas encore eu lieu dans les zones montagneuses froides comme le Moyen Atlas (FINER *et al.*, 2011). Ces racines blanches sont extrêmement efficaces en matière d'absorption de l'eau et des éléments minéraux (LAMHAMEDI & BERNIER, 1994 ; FINER *et al.*, 2011 ; MONTAGNOLI *et al.*, 2012).

En mai, le PHM a été moins négatif, les valeurs observées ont varié entre -5,67 bars et -17,92 bars. Ces valeurs indiquent que les pertes d'eau par transpiration n'étaient pas importantes, bien que le sol ait été suffisamment humide après les précipitations du mois d'avril, que les jours d'échantillonnage aient été nuageux et que le soleil intermittent était moins favorable aux échanges gazeux optimaux (HINCKLEY *et al.*, 1978). D'ailleurs, les différences entre arbres sains et dépérissants n'étaient pas assez évidentes à travers ces mesures. La présence de nuages denses ne permet pas de générer des intensités de lumière saturantes pour une photosynthèse active (KOZLOWSKI *et al.*, 1991 ; TAOUFIK, 2006).

Les observations effectuées en juin et juillet ont montré que le PHM a enregistré des valeurs plus négatives que celles observées en mai. Celles de juillet sont encore plus négatives que les valeurs enregistrées en juin (Figure 8), le mois de juillet étant plus chaud et sec (Figure 4). Les valeurs observées en juillet ont varié entre -21,08 bars chez les arbres sains de la placette 54 et -29,83 bars chez les arbres dépérissants de la placette 10. Les placettes 119 et 120 ont montré des valeurs respectivement de -21,75 bars et -24,92 bars, nettement moins négatives que les arbres dépérissants de la placette 10. Mais en général, les valeurs du PHM ont été plus négatives que -20 bars, ce qui indique une activité très intense des échanges gazeux chez le Cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas pendant cette période. Cette forte activité physiologique a été associée au réchauffement du climat, à une bonne disponibilité en eau des sols (Figure 5) et à des conditions atmosphériques favorables (Figure 4) (HINCKLEY *et al.*, 1978 ; KOZLOWSKI *et al.*, 1991).

### **Amplitude journalière du potentiel hydrique**

L'évolution de l'amplitude journalière du potentiel hydrique (AJPH) n'est pas similaire à celles du PHB et du PHM (Figure 8). En mars, les valeurs observées ont montré que l'AJPH a été assez faible variant de 1,75 bars chez les arbres sains de la placette 54 et 12,33 bars chez les arbres dépérissants de la placette 10. En général, les arbres dépérissants ont présenté une AJPH plus grande que celles des autres arbres. Cette différence a été plus marquée en mars et juillet lorsque les conditions du climat et des sols sont devenus plus difficiles que lors des autres mois (Figure 4).

En mai, l'AJPH a enregistré des valeurs proches de celles observées en mars, bien que les sols aient été suffisamment humides après les précipitations survenues en avril (Figures 4 et 5). Les mesures effectuées en mai ont coïncidé avec une période nuageuse et des températures encore fraîches. A cette période, le potentiel hydrique de midi a enregistré aussi des valeurs moins faibles (Figure 9). Des valeurs faibles de l'AJPH indiquent la faiblesse des échanges gazeux qui sont limités par des conditions atmosphériques défavorables (déficit de lumière et air plus humide). Ces

observations montrent que le cèdre est une essence de lumière qui exige des intensités de lumière relativement importantes pour un fonctionnement optimal des échanges gazeux. Cet optimum est supérieur à 300  $\mu\text{moles/m}^2/\text{s}$  (TAOUFIK, 2006). A cet égard, il serait souhaitable d'opter pour des densités d'arbres à l'échelle du peuplement qui permettent la pénétration de la lumière à la cime des arbres afin que la majorité des aiguilles de celle-ci soit exposée aux intensités de lumière saturante de la photosynthèse (1000  $\mu\text{moles/m}^2/\text{s}$ ). Cette ouverture du peuplement favoriserait également l'installation et la régénération des jeunes semis (LAMHAMEDI & CHBOUKI, 1994 ; AUSSENAC, 2000 ; BREDA *et al.*, 2006 ; BENABID, 2000).

L'AJPB a augmenté en juin enregistrant des valeurs maximales variant entre 12,17 bars et 14,75 bars. Les valeurs les plus élevées ont été observées chez les arbres des placettes 76, 54 et 04. Les arbres dépérissants ont présenté des valeurs relativement plus élevées, mais la différence n'est pas significative ( $p < 0,01$ ) (Figure 9).

En juillet l'AJPB a diminué par rapport au niveau observé en juin, mais plus élevé que celui enregistré en mai. Cette diminution est associée à la réduction des teneurs en eau des sols et l'augmentation importante de la température de l'air (Figures 4 et 5). La diminution de l'ampleur de l'AJPB amorcée en juillet traduit certainement le début de la période de stress hydrique que le cèdre doit affronter tout l'été et le début de l'automne jusqu'à l'avènement des précipitations automnales et/ou à l'occasion d'orages sporadiques.

En considérant les moyennes de toutes les données par placette (Figure 9), l'AJPB a varié entre 8 et 12 bars. Elle a été plus élevée chez les arbres dépérissants des placettes 4 et 10 sur substrat dolomitique et calcaire.

Les placettes 119 et 120 se singularisent par une AJPB élevée (supérieure à 10 bars) et un PHB moins négatif (-10 bars en moyenne). Ce comportement écophysologique montre un fonctionnement optimum du Cèdre de l'Atlas qui se développe dans une station très favorable située sur substrat basaltique, pente faible à très faible et exposition NO plus arrosée. De fait, le dépérissement est très rare dans ce type de conditions écologiques.

Il est intéressant de remarquer que les arbres de toutes les placettes ont, en moyenne, une AJPB supérieure à 8 bars, ce qui montre l'importance de la dynamique des échanges gazeux chez le cèdre dans toutes les situations (stationnelles et climatiques) de son développement au Moyen Atlas. Cependant, les arbres des placettes 76, 10 et 4 ont montré, en moyenne, une AJPB plus grande ( $> 8$  bars) et un PHB plus négatif ( $< -10$  bars). Ce comportement écophysologique pourrait montrer un dysfonctionnement des relations hydriques de ces arbres qui se développent dans des conditions assez défavorables (pente très forte, sol superficiel, expositions chaudes, densité forte du Chêne vert). D'ailleurs, le dépérissement du cèdre est assez fréquent dans ces placettes.

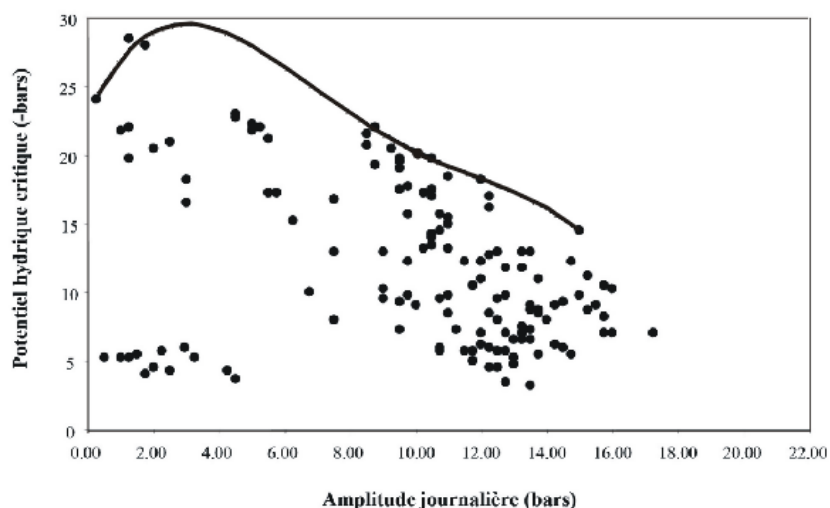
### **Potentiel hydrique critique**

Le potentiel hydrique de base critique pour le Cèdre de l'Atlas estimé se situe entre -28 et -30 bars (Figure 10). Cette valeur cadre avec celles citées dans la littérature (AUSSENAC & GRANIER, 1978 ; AUSSENAC & VALETTE, 1982). Elle est supérieure (moins négative) à celles déterminées sur des semis de cèdre de deux ans soumis à un déficit hydrique édaphique artificiel par suppression de l'arrosage (TAOUFIK, 2006). Le niveau du potentiel hydrique critique déterminé dans ce travail est cependant plus négatif que ceux déterminés par d'autres espèces de pin et de sapin (AUSSENAC & FINKELSTEIN, 1983 ; DUCREY, 1988). La faible valeur du potentiel hydrique de base critique indique que le cèdre de l'Atlas tolère les pertes de l'eau par transpiration jusqu'à un niveau plus négatif du potentiel de base et de ce fait, peut être considéré comme espèce anisohydrique qui est adaptée à des sécheresses épisodiques non prolongées (DUCREY, 1988 ; LADJAL *et al.*, 2000 ; MCDOWELL *et al.*, 2008). En effet, cette essence se caractérise par un potentiel très dynamique d'absorption d'eau par les racines qui colonisent principalement les couches supérieures du sol, et qui réagit rapidement aux précipitations, mêmes faibles. L'absorption de l'eau par les aiguilles, directement à partir de l'air, est aussi plausible, mais cette hypothèse mérite d'être étudiée. Cependant il semble que le cèdre a besoin d'une eau facilement disponible et suffisante. Il n'est pas rare de trouver des bouquets de semis dans les ravins des routes, sur des remblais ou sur des matériaux d'anciennes carrières où le substrat est remué, où l'eau s'accumule et peut être absorbée facilement

(Figures 12 et 13). Le Cèdre de l'Atlas pourrait être considéré comme une espèce opportuniste sur le plan hydrique.

En considérant le potentiel de base critique déterminé, les niveaux du potentiel hydrique de base et de midi enregistrés en mars et en juillet (Figure 8) montrent que les arbres de cèdre de l'Atlas étaient plus stressés en mars et en juillet 2007. En mars, le potentiel hydrique de base a enregistré des valeurs proches de -30 bars au niveau des arbres dépérissants de la placette 10 située dans la forêt d'Ait Youssi.

Par ailleurs, l'analyse de la relation entre le PHB et l'AJPH montre que la limite supérieure de l'optimum du fonctionnement hydrique du cèdre se situe près de 16 bars et - 20 bars respectivement pour l'AJPH et le PHB lorsque la lumière n'est pas un facteur limitant (Figure 10). A ce niveau, on peut noter que la dynamique des échanges gazeux est importante. Mais à des niveaux du PHB plus faible que -20 bar, la teneur en eau des sols est fortement réduite, ce qui exposerait les arbres à un stress hydrique (Figures 8 et 10). En juillet, les valeurs les plus faibles du PHB (-19,25 bars, -19,33 bars et -19,58 bars) ont été enregistrées respectivement chez les arbres dépérissants des placettes 76, 10 et 4. Ces placettes situées à l'Est de la forêt d'Azrou dans des conditions moins mésophiles sont défavorisées sur le plan climatique, édaphique et hydrique et offrent des conditions moins favorables pour le développement du cèdre de l'Atlas, notamment pendant les années sèches. D'ailleurs, sous ces conditions, le nombre d'arbres dépérissants était élevé (Figure 1).



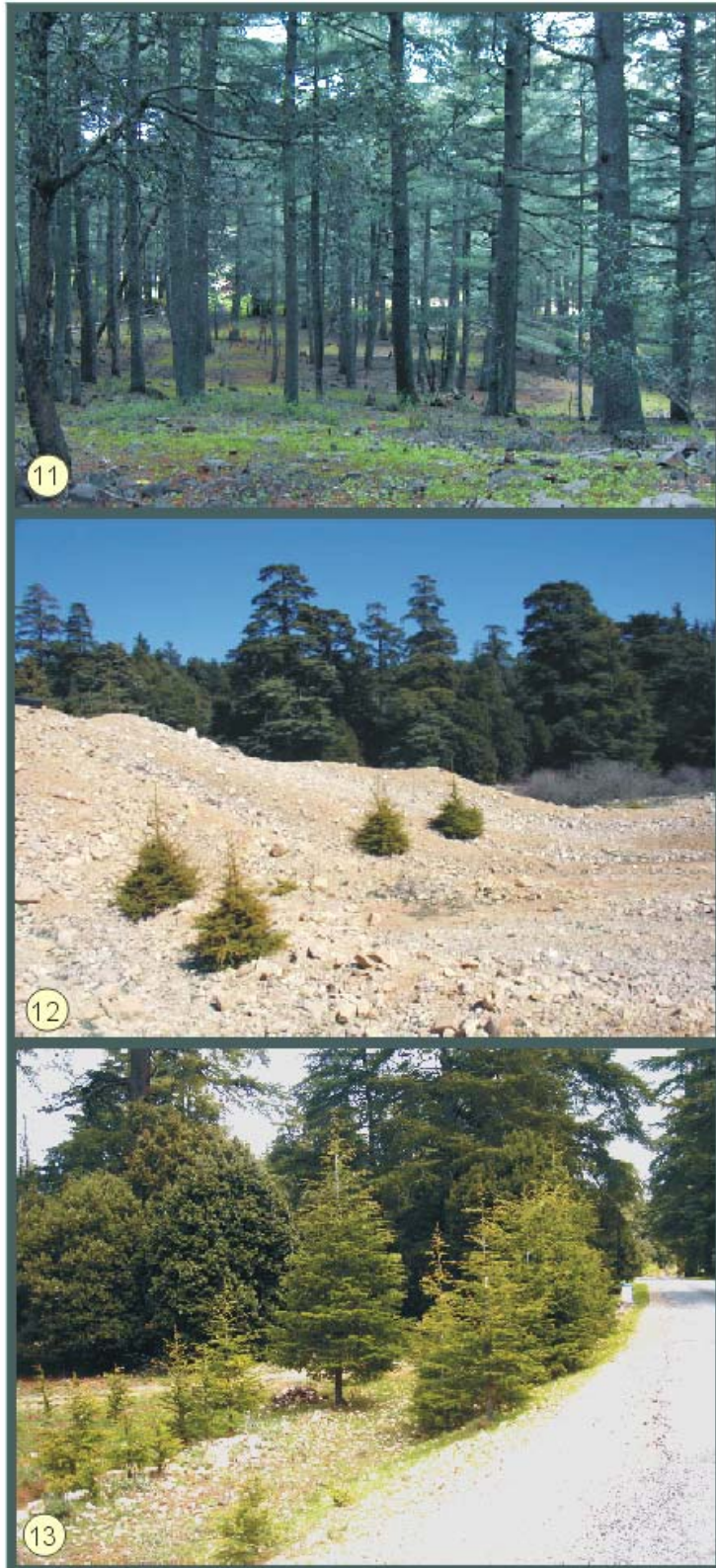
**Figure 10 :** Relation entre le potentiel hydrique de base (pré-aube) et l'amplitude journalière du potentiel hydrique des arbres du Cèdre de l'Atlas.

L'analyse des valeurs du potentiel hydrique de midi (PHM) enregistrées chez les arbres sains et dépérissants montre que ce paramètre atteint, pendant la période d'échantillonnage, des valeurs proches du potentiel hydrique critique, notamment en mars et juillet 2007. Cet état de stress est plus prononcé chez les arbres dépérissants des parcelles 76, 54, 10 et 4 situées dans le Canton de Boutrouba (forêt d'Azrou) et la forêt d'Ait Youssi qui se développent sur calcaire et calcaire dolomitique. Il est à souligner que cet état de stress se produit alors que les sols n'ont pas encore atteint des niveaux critiques de déficit hydrique (Figures 5 et 8). Il est certain que le niveau de stress hydrique deviendrait de plus en plus accentué au cours de l'été et même en début d'automne avec la réduction des disponibilités hydriques des sols et l'élévation de la température. Les indications observées peuvent expliquer l'abondance des arbres dépérissants, ainsi que la mortalité des arbres dans les parcelles 76, 54, 10 et 4.

### Comportement écophysologique des arbres dépérissants

La discrimination entre « arbres sains » et « arbres dépérissants » ne semble pas assez importante, mais statistiquement significative ( $p < 0,01$ ) pour la plupart des paramètres du potentiel





**Figure 11 :** Peuplement dense de cèdre de l'Atlas sans dépérissement sur substrat basaltique dans la forêt d'Azrou au sud de la ville d'Azrou (Photo : Zine El Abidine).

**Figure 12 :** Régénération naturelle du cèdre de l'Atlas dans la forêt d'Azrou sur substrat calcaire dans une carrière (Photo : Zine El Abidine).

**Figure 13 :** Régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au bord des pistes et des routes où le bilan hydrique est très favorable (Photo : Zine El Abidine).

hydrique. Les mesures des relations hydriques effectuées ont concerné uniquement le printemps et le début de l'été alors que la teneur en eau des sols était relativement favorable (Figure 5). Les différences de comportement pourraient s'amplifier lorsque les disponibilités hydriques des sols diminuent fortement, à partir de juillet, en association avec l'augmentation des chaleurs de l'été (MCDOWELL *et al.*, 2008 ; ADAMS *et al.*, 2010 ; ALLEN *et al.*, 2010).

Les arbres dépérissants de cèdre ont présenté, en général, un potentiel hydrique de base plus négatif, un potentiel hydrique de midi plus négatif et une amplitude journalière du potentiel hydrique plus grande (Figures 8 et 9). Les différences entre arbres sains et arbres dépérissants ont été plus évidentes dans les placettes 76, 4 et 10 localisées dans un contexte écologique peu favorable. Ces observations montrent que les arbres dépérissants présentent un déficit hydrique par rapport aux arbres sains. Ce déficit pourrait résulter des déficiences au niveau de leur capacité d'absorption racinaire (FINER *et al.*, 2011 ; MONTAGNOLI *et al.*, 2012), d'une perte de leur conductivité hydraulique et d'un contrôle stomatique moins efficace des pertes en eau par transpiration (LADJAL *et al.*, 2005 ; MCDOWELL *et al.*, 2008 ; CHOAT *et al.*, 2012, FAN *et al.*, 2012).

La déficience de l'absorption racinaire peut être due aussi à une croissance et un renouvellement des racines moins importants que dans le cas d'arbres sains (LAMHAMEDI & BERNIER, 1994). Ce dysfonctionnement de la croissance racinaire pourrait résulter d'un déséquilibre au niveau de l'allocation du flux des assimilats de la photosynthèse à la croissance racinaire, dû à l'effet du stress hydrique et une photosynthèse moins efficace en raison de l'état physiologique des aiguilles, comme il peut être causé par l'attaque des racines par des pathogènes (FINER *et al.*, 2011). En effet, il a été montré que les arbres stressés allouent plus d'assimilats à la synthèse des sucres et de métabolites tels que les huiles essentielles, les résines, les terpènes etc., pour les besoins de défense et la conservation de la viabilité des structures tissulaires (KOZLOWSKI *et al.*, 1991 ; KOZLOWSKI, 1992 ; MCDOWELL *et al.*, 2008). Le coût d'entretien de la croissance et la survie des plantes se développant dans des conditions écologiques stressantes paraît plus élevé à celui des plantes qui disposent de conditions plus favorables (LAUREANO *et al.* 2013).

Les déficiences du contrôle stomatique peuvent résulter aussi d'un dysfonctionnement physiologique du fonctionnement des stomates en relation avec un déséquilibre hormonal et particulièrement la synthèse de l'acide abscissique dont le rôle est fondamental dans la fermeture des stomates sous conditions de stress (HOPKINS, 2003). Les attaques pathogènes et la pollution peuvent aussi être à l'origine de ce dysfonctionnement à titre de stress secondaire (KOZLOWSKI *et al.*, 1991).

Par ailleurs, les différences de comportement entre arbres sains et arbres dépérissants sont plus évidentes lorsque la teneur en eau des sols est faible et les conditions climatiques sont plus contraignantes, comme celles qui prévalaient en mars et en juillet 2007. Ces conditions défavorables influencent aussi négativement le comportement des arbres sains qui ont réagi par des potentiels hydriques de base et de midi plus négatifs et des amplitudes journalières du potentiel hydrique plus réduites. Cette sensibilité du Cèdre de l'Atlas par rapport aux hautes températures a été signalée (LADJAL *et al.*, 2000) et pourrait contribuer aux processus de dépérissement (ADAMS *et al.*, 2010 ; ALLEN *et al.*, 2010 ; CHOAT *et al.*, 2012). Mais, ce comportement varie en fonction des caractéristiques écologiques des placettes et même au sein de la même placette en fonction des conditions micro-stationnelles.

La réduction des disponibilités hydriques induirait une forte compétition entre les arbres du cèdre et entre ce dernier et les arbres du chêne vert (*Quercus retundifolia* L.) conduisant au déclenchement du phénomène de dépérissement qui s'attaque aux arbres les plus sensibles et les moins adaptés qui sont les premiers à être éliminés (NEWTON *et al.*, 1986 ; AUSSENAC, 1993 ; AUSSENAC *et al.*, 1995 ; AUSSENAC, 2000 ; ET-TOBI, 2006 ; FAN *et al.*, 2012 ; KUKOWSKI *et al.*, 2012).

L'échantillonnage réalisé en juillet a permis de constater que les arbres de la forêt d'Azrou (placettes 119 et 120) sur substrat basaltique présentent un potentiel hydrique moins négatif et sont encore plus verdâtres, ayant des aiguilles denses, et présentent une croissance encore active. Celle-ci est exprimée par des pousses plus longues et verdâtres. Cependant, les arbres des autres placettes situées dans des conditions écologiques relativement défavorables, dont notamment les placettes 54, 76 (forêt d'Azrou), 10 et 4 (forêt d'Ait Youssi), présentent un aspect moins vigoureux qui paraît être plus affecté par les chaleurs de l'été et la diminution de la teneur en eau des sols. Ces arbres présentent une croissance moins active et les pousses de l'année sont souvent très courtes. De plus, de

nombreuses attaques parasitaires ont été observées sur les rameaux et les tiges de ces arbres. Les arbres de ces placettes montrent aussi des aiguilles sèches qui tombent au simple mouvement des branches. Il s'agit de pertes des aiguilles qui se produisent généralement chez les arbres forestiers à la suite de la réduction des teneurs en eau des sols et de l'assèchement de l'air. Ce phénomène est encore plus accentué chez les arbres de la placette 10 de la forêt d'Ait Youssi située dans un couloir qui s'ouvre sur la région de Boulmane à l'est (couloir du vent Chergui), une région xérophile.

## CONCLUSION

L'analyse écophysiological entreprise dans le cadre de ce travail est la première de ce genre réalisée au Maroc sur des arbres matures de *Cedrus atlantica* au Moyen Atlas dans son milieu naturel. Les résultats obtenus sont originaux et concordent avec ceux observés en particulier en France (DUCREY, 1994 ; LADJAL *et al.*, 2005) et confirme le caractère anisohydrique du Cèdre de l'Atlas (MCDOWELL *et al.*, 2008). Les échanges gazeux se poursuivent même à des niveaux faibles des teneurs en eau des tissus et du sol. Cependant, si ce comportement permet au cèdre de continuer l'absorption de CO<sub>2</sub>, il l'expose au dysfonctionnement hydraulique et aux processus de dépérissement (MCDOWELL *et al.*, 2008 ; ADAMS *et al.*, 2010). Ce risque est d'autant plus grand que le Cèdre de l'Atlas paraît plus sensible aux conséquences des changements climatiques qui entraîneraient une augmentation des températures et une réduction des précipitations (DEMARTEAU *et al.*, 2007).

Les prospections sur le terrain ont aussi montré que la densité des peuplements est forte dans la plupart des stations (ANONYME, 2007). Les peuplements mixtes de cèdre et de chêne vert montrent plus de dépérissement des arbres de cèdre dans ce cas que dans celui des cédraies pures sur substrat basaltique. La relation de compétition entre le cèdre et le chêne vert n'a pu être explorée sur le plan écophysiological. Le Chêne vert, qui est plus disposé à résister aux conditions écologiques difficiles (BENABID, 2000) paraît plus compétitif que le cèdre de l'Atlas sur le plan hydrique. En outre, les conditions écologiques défavorables telles que des expositions plus chaudes, des sols superficiels ou sablonneux sur des pentes fortes et dont la capacité de retenir l'eau est limitée, prédisposent les arbres de cèdre au dépérissement lorsque les sécheresses sont longues. Au contraire, sur substrat basaltique et des expositions fraîches, le dépérissement est très rare, même si la densité du cèdre est forte (cas des forêts qui se développent sur substrat basaltique). En général, les conditions microstationnelles, liées en particulier à la variabilité de la profondeur du sol et la disponibilité de l'eau, peuvent modifier largement le comportement écophysiological des arbres et leur développement (KOZLOWSKI *et al.* 1991 ; FAN *et al.*, 2012 ; KUKOWSKI *et al.*, 2012 ; PASHO *et al.*, 2012 ).

Par ailleurs, la variabilité individuelle dans le comportement écophysiological des arbres paraît jouer aussi un rôle important dans la réaction du cèdre à la variation des facteurs écologiques. Cette variabilité est observée aussi par rapport à différentes caractéristiques telles que la vigueur des arbres, l'insertion des branches et des bouquets d'aiguilles et à la couleur et la consistance des aiguilles. Cette variabilité prononcée mérite d'être étudiée sur le plan génétique.

Ces résultats sont en faveur de l'adoption d'un aménagement approprié des cédraies basé entre autre sur l'application d'une sylviculture raisonnée permettant de chercher un équilibre entre la densité des peuplements et les disponibilités hydriques des sols modulables selon les conditions écologiques des stations et des structures des peuplements (AUSSENAC, 2000 ; BREDA *et al.*, 2006 ; FAN *et al.* 2012 ; PASHO *et al.*, 2012). Cette alternative d'aménagement doit être aussi adaptée au contexte des perspectives du changement du climat, dont les prémisses commencent déjà à être observées, par l'intégration d'un programme de sélection génétique de génotypes qui seraient plus adaptées aux stress environnementaux actuels et futurs pour la réhabilitation des cédraies dégradées (NEWTON *et al.*, 1986 ; AUSSENAC, 2002 ; BREDA *et al.*, 2006 ; DEMARTEAU *et al.*, 2007 ; ELFVING, 2010 ; ANDEREGG *et al.*, 20012 ; CHOAT *et al.*, 2012).

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier du projet « Etude des causes du dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas » du Haut Commissariat aux Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification (Projet « *Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR – GCEFLCD* ») ainsi que du projet AGORA, lors de la mobilité du professeur Zine El Abidine effectuée en octobre 2012 à l'INRA d'Avignon (France) ; ce qui lui a permis d'approfondir ses connaissances dans ce domaine. Les auteurs tiennent à remercier aussi le Fonds international de coopération universitaire de l'Agence universitaire de la Francophonie pour son appui financier accordé au Dr. Mohammed Lamhamedi. Cet appui a permis de développer différents projets de R-D et la réalisation de différentes activités de transfert de connaissances et de savoir-faire. Les auteurs remercient également MM. Mario Renaud et Pascal Desjardins, ainsi que Mme Marie-Pierre Jalbert de la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles du Québec pour leur aide aussi précieuse lors de la phase de rédaction de cet article.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABOUELASOUD B., 2005. Cartographie et caractérisation du dépérissement du cèdre dans le Moyen Atlas : cas de la cédraie d'Azrou. Mémoire du 3ème cycle de l'ENFI. 76p.
- ACHEHBOUNE J., 2006. État actuel du dépérissement du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas central en relation avec la station et la sylviculture : Cas des forêts de Jbel Aoua sud et Ait Youssi Amekla (Canton Lalla Mimouna). Mémoire du 3ème cycle de l'ENFI. 96p.
- ADAMS, H.D., MACALADY, A.K., BRESHEARS, D.D., ALLEN, C.D., STEPHENSON, N.L., SALESKA, S.R., HUXMAN, T.E. & MCDOWELL, N.G., 2010. Climate-induced tree mortality: Earth system consequences. *EOS*, 91: 53-54.
- ALLEN, C.D., MACALADY, A.K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., MCDOWELL, N., VENNETIER, F M., KITZBERGER, T., RIGLING, A., BRESHEARS, D.D., HOGG, E.H., GONZALEZ, P., FENSHAM, R., ZHANG, Z., CASTRO, J., DEMIDOVA, N., LIM, J.-H., ALLARD, G., RUNNING, S.W., SEMERCI, A. & COBB, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259: 660-684.
- ANDEREGG, W.R., KANE, J.M. & ANDEREGG, D.L., 2012. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, September : 1- 7.
- ANONYME, 1994. Le cèdre de l'Atlas. Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas, Ifrane (Maroc), 7-11 juin 1993. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27 (spécial), vol. 1 et 2 : 733 p.
- ANONYME, 1999. Le grand livre de la forêt marocaine. Edition Mardaga, Belgique, 280 p.
- ANONYME, 2006. Etude d'aménagement concerté des forêts et parcours collectifs de la province d'Ifrane. Haut Commissariat Aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification.
- ANONYME, 2007. Etude des causes de dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas. Projet « Etude des causes du dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas » élaboré par le Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD), avec l'assistance de la FAO, dans le cadre général de la « *Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR*. Appui à la mise en œuvre du programme forestier national ». Haut Commissariat Aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification.
- AUSSENAC, G., 1992. Ecologie, écophysiologie et sylviculture. *Naturalia Monspeliensia*, Série Botanique, 67 : 3-77.
- AUSSENAC, G., 1993. Déficits hydriques et croissance des arbres forestiers. *Forêt Entreprise*, 89 : 40-47.
- AUSSENAC, G., 2000. Interactions between forests stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for sylviculture. *Ann. For. Sci.*, 57 : 287-301.
- AUSSENAC, G., 2002. Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. *Ann. For. Sci.* 59 : 823-832.
- AUSSENAC, G., & GRANIER, A., 1978. Quelques résultats de cinétique journalière de potentiel de sève chez les arbres forestiers *Ann. Sci. For.* 35 : 19-32.
- AUSSENAC, G., & VALETTE, J.C., 1982. Comportement hydrique estivale de *Cedrus atlantica* M., *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. For.* 39 : 41-62.
- AUSSENAC, G., & FINKEISTEIN, D., 1983. Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du Cèdre. *Ann. Sci. For.* 40 : 11 p.
- AUSSENAC, G, GRANIER, A. & BREDI, N., 1995. Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For.Fra.* XLVII, 1 : 54-62.

- BENABID, A., 2000. Flore et écosystèmes du Maroc. Evaluation et préservation de la biodiversité. Editions Ibis Presse Paris. 359 p.
- BENTOUATI A., 2008. La situation du cèdre de l'Atlas dans les Aurès (Algérie). *Forêt Méditerranéenne* XXIX, 2 : 203-208.
- BREDA, N., GRANIER, A., & DREYER, E., 2004. Physiologie des arbres : Les effets de la sécheresse et de la canicule. *Forêt de France*, 474 : 23-24.
- BREDA, N., HUC, R., GRANIER, A. & DREYER, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological response, adaptation processes and long term consequences. INRA, EDP Sciences. *Ann. For. Sci.* 63 : 625-644.
- BURGESS, S.S.O., & DAWSON, T.E., 2004. - The contribution of fog to the water relations of *Sequoia sempervirens* (D. Don): foliar uptake and prevention of dehydration. *Plant, Cell. and Environment*. 27: 1023-1034.
- CHOAT, B., JANSEN, S., BRODRIBB, T.J., COCHARD, H., DELZON, S., BHASKAR, R., BUCCI, S.J., FIELD, T.S., GLEASON, S.M., HACKE, H.G., JACOBSEN, A.L., LENS, F., MAHERALI, H., MARTI'NEZ-VILALTA, J., MAYR, S., MENCUCCINI, M., MITCHELL, P.J., NARDINI, A., PITTERMANN, J., PRATT, R.B., SPERRY, J.S., WESTOBY, M., WRIGHT, I.J. & AMY, E. ZANNE 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 49 : 752-755.
- CRUIZIAT, P. & TYREE, M.T., 1990. La montée de la sève dans les arbres. *La Recherche*, 220: 406-414.
- DEMARTEAU, M., FRANCOIS, L., CHEDDADI, R. & ROCHE, E. 2007. Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. *Geo-Eco-Trop*, 31 :105-146.
- DERRAK, M., 2003. Contribution à l'estimation de l'espace vital de croissance et des conditions de mortalité du cèdre de l'Atlas. Cas de la cédraie de Sidi M'Guild (Moyen Atlas).Mémoire 3ème cycle de l'ENFI, 2003, 69p.
- DUCREY, M., 1988. Réaction à la sécheresse de quelques essences forestières méditerranéennes. *Rev. For. Fra.* 40 (5) : 359-370.
- DUCREY, M., 1994. Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen : aspects écophysologiques de sa réaction à la sécheresse. *Annales de la Recherche Forestière du Maroc*. 27 : 140-152.
- ELFVING, B., 2010. Natural mortality in thinning and fertilisation experiments with pine and spruce in Sweden. *For. Ecol. Manage.* 260 : 353-360.
- ET-TOBI, M., 2006. Approche multidimensionnelle des relations "Etat sanitaire- Station – Sylviculture" pour l'étude du dépérissement des cédraies au moyen Atlas en vue d'élaborer un modèle sylvicole de prévention phytosanitaire. Thèse présentée à l'institut agronomique et vétérinaire Hassan II. 174 p. + Annexes.
- FAN, Z., FAN, X., CROSBY, M.K., MOSER, W.K., HE, H., SPETICH, M.A. & SHIFLEY, S.R., 2012. Spatio-temporal trends of oak decline and mortality under periodic regional drought in the Ozark Highlands of Arkansas and Missouri. *Forests*, 3 : 614-631.
- FINER, L., OHASHI, M., NOGUCHI, K., & HIRANO, Y., 2011. Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, 261: 265-277.
- GILLIAN, A., 2005. Problématique de dépérissement de la cédraie du moyen Atlas. Exposé présenté à l'Atelier de la commission du projet chargé de diagnostic des facteurs de dépérissement de la cédraie du moyen Atlas. DREF Moyen Atlas à Meknès.
- GOLDSMITH, G.R., MATZKE, N.J., & DAWSON, E.T., 2012. The incidence and implications of clouds for cloud forest plant water relations. *Ecology Letters*, 10 : 1-8.
- HINCKLEY, T. M., LASSOIE, J.P., & RUNNING, S.W., 1978. Temporal and spatial variation in the water status of forest trees. *Forest Science, Mono*, 20 : 1-72.
- HOPKINS, G., 2003. Physiologie végétale. 2ème édition traduite en français par S. RAMBOUR. Edition De Boeck, Bruxelles, Belgique, 514 p.
- KOZLOWSKI, T.T., 1992. Carbohydrates sources and sinks in woody plants. *The Botanical Review*, 58 (2) : 107-222.
- KOZLOWSKI, T.T, KRAMER P.J., & PALLARDY, S.G., 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press, New York, 811 p.
- KRAMER, P.J., 1983. Water relations of plants. Academic Press, New- York, 489 p.
- KUPARINEN, A., SAVOLAINEN, O., & SCHURR, F., 2010. Increases mortality can promote evolutionary adaptation of forest trees to climate change. *Forest Ecology and Management* 259 : 1003-1008.
- LADJAL, M., ROLAND, H., & DUCREY, M., 2000. Ecophysiological response to drought by seedlings of *Cedrus atlantica*, *C. libani* and *C. brevifolia*., in Panetsos K.P. (Ed), Adaptation and selection of Mediterranean *Pinus* and *Cedrus* for sustainable reforestation of marginal lands. Proceeding of



- the final Conference of the European Union Joint Research Project FAIR CT 95-00 97, Mytilene 2-6 June 2000, pp : 83-88.
- LADJAL, M., ROLAND, H., & DUCREY, M., 2005. Drought effects on hydraulic conductivity and xylem vulnerability to embolism in divers species and provenances of Mediterranean cedars. *Tree Physiology* 25 : 1109-1117.
- LAMHAMEDI, M. S. & BERNIER, P.Y., 1994. Ecophysiology and field performance of black spruce: a review. *Ann. Sci. For.* 51 : 529-551.
- LAMHAMEDI, M. S. & CHBOUKI, N., 1994. Les principaux facteurs influençant la régénération naturelle du Cèdre de l'Atlas. *Ann. Rech. For.* 27 (spécial) : 243-258.
- LANDMANN, G., 1994. Concepts, définitions et caractéristiques générales des dépérissements forestiers. Les dépérissements des forêts : Causes connues et inconnues, *Rev. For. Fra.*, 5: 405- 415.
- LAUREANO, R. G., GARCIA-NOGALES, A., SECO, J. I., RODRIGUEZ, J. G. P., LINARES, J. C., MARTINEZ, F. & MERINO, J., 2013. Growth and maintenance costs of leaves and roots in two populations of *Quercus ilex* native to distinct substrates, *Plant Soil*, 363: 87-99.
- M'HIRIT, O., 1982. Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain – Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytocéologie et de la productivité du cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti). Thèse ès-Sciences naturelles. Fac. St. Jérôme ; Marseille, 436 p + Annexes.
- M'HIRIT, O., 1994. Le cèdre de l'Atlas : Présentation générale et état des connaissances à travers le réseau Silva Mediterranea : « Le Cèdre ». Actes du Séminaire International sur le Cèdre de l'Atlas. Ifrane (Maroc) 7-11 juin 1993. *Ann. Rech. For.* 27(1) : 4-49.
- MCDOWELL, N., OOCKMAN, W.T., ALLEN, C.D., BRESHEARS, D.D., COBB, N., KOLB, T., PLAUT, J., SPERRY, J., WEST, A., WILLIAMSON, D.G. & YEPEZ, E.A., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New Phytologist*, 178 : 719-739.
- MONTAGNOLI A., TERZAGHI M., DI IORIO A., STEFANIA S. CHIATANE D. 2012. Fine-root morphological and growth traits in a turkey-oak stand in relation to seasonal changes in soil moisture in the southern Apennines, Italy. *Ecol. Res.* 27: 1015-1025.
- NEWTON, R.J., MEIR, C.E., VAN BUIJTENNEN, J. P., & MCKINLEY, C. R., 1986. Moisture-stress management: silviculture and genetics. Stress physiology and forest productivity Proceeding, Texas agricultural experiment station, college station. 239 p.
- NIERDERLENDER, L., 2009. Dépérissement des cèdres (*Cedrus atlantica*, *Cedrus Libani* et *Cedrus deodara*) au domaine des Barres et à l'arboretum d'Amance. Etude dendroécologique : rôle du climat, du bilan hydrique et de la gestion sylvicole. Rapport de stage de Master 2 "Forêt Agronomie Environnement" spécialité "Conservation et Restauration des Ecosystèmes". INRA. Université Henri Poincaré, 25p.
- OU-TAHAR, T. A., 1994. Le dépérissement des cédraies dans le Haut Atlas oriental Mémoire 3ème cycle de l'ENFI. 134p.
- PASHO, E., CAMARERO, J.J., LUIS M., VICENTE-SERRANO, S.M., 2012. Factors driving growth responses to drought in Mediterranean forests, *Eur. J. Forest. Res.*, 131:1797–1807.
- STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H., 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. McGraw-Hill Publishing Company, New York, 633 p.
- TAOUFIK, A., 2006. - Essai d'analyse écophysologique du dépérissement du *Cedrus atlantica* Manetti par l'étude des relations hydriques des jeunes plants du cèdre soumis à une sécheresse édaphique. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle de l'ENFI, 137 p.
- TOUCHAN, R., ANCHUKAITIS, K.J., MEKO, D.M., SABIR, M., ATTALAH, S. & ALOUI, A., 2011. Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim Dyn*, 37 : 237–252
- ZINE EL ABIDINE, A., 1993. Les relations hydriques et les échanges gazeux de quatre populations d'épinette noire (*Picea mariana* Mill.BSP.) en relations avec leur tolérance au stress hydrique. Thèse de Doctorat (Ph.D). Université Laval, Québec, Canada, 171p.
- ZINE EL ABIDINE, A., 2003. Le dépérissement des forêts au Maroc : analyse et stratégies de lutte. *Sécheresse* ; 14 (4) : 18-209.
- ZINE EL ABIDINE, A., BERNIER, P.Y., & PLAMONDON A.P., 1995. Diurnal and Seasonal variation in Gas Exchanges and water Relations of two lowland and two Upland Black Spruce ecotypes. *Can. J. Bot.* 73 : 716-722.
- ZINE EL ABIDINE, A., BERNIER, P.Y., & PLAMONDON, A.P., 1997. -Ecophysologie de l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.BSP.) en relation avec sa tolérance au stress hydrique. *Ann. Rech. For. Maroc*, 30 : 145-166.

ZINE EL ABIDINE, A. & ABOULABBESS, O., 2004. Dépérissement du cèdre du cause moyen Atlasique : Hypothèses plausibles et thèmes de recherche proposés. Atelier de restitution sur la problématique des dépérissements de la cédraie du moyen Atlas, jeudi 8 avril 2004. HCEFLCD. 6p.