

Estimation des besoins en eau du Cèdre à Ras El Ma et à Boutrouba (Moyen Atlas Central tabulaire)

M. AOUBOUAZZA¹

(Reçu le 21/02/2017; Accepté le 14/02/2018)

Résumé

Les besoins en eau des arbres forestiers constituent une préoccupation grandissante dans le secteur forestier suite à la prise de conscience de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique des sols. Ces besoins posent toujours un problème dans ce domaine d'autant plus que l'on cherche à les quantifier sur des espaces à grandes échelles et avec des évolutions climatiques probables. L'objectif global de cette étude est de parvenir à une estimation des besoins en eau du cèdre au Moyen Atlas, en vue de déterminer les régions présentant de grandes potentialités pédo-climatiques pour le cèdre et fournir aux forestiers de nouveaux outils de gestion. L'objectif spécifique consiste à rechercher une méthodologie simple pour estimer les besoins en eau du cèdre, à travers le suivi du régime hydrique, du stock en eau et du bilan hydrique du sol, calculé à partir des précipitations, du ruissellement, de l'évapotranspiration et du drainage. Les besoins en eau du cèdre de différentes classes d'âge ont été évalués en année humide exempte de stress hydrique et thermique. Les valeurs des besoins en eau, de 320 mm pour une forêt de cèdre jeune et 460 mm pour une forêt de cèdre adulte, concordent avec les résultats rapportés dans la littérature. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que l'évapotranspiration réelle Thornthwaite déduite du bilan hydrique du sol, et correspondent au cumul des pluies enregistrées annuellement durant les deux périodes de croissance du cèdre observées par M'hirit dans le Moyen Atlas.

Mots-clés: Besoins en eau, cèdre, Moyen Atlas, bilan hydrique, sol, évapotranspiration réelle, Maroc.

Estimation of cedar water requirements in Ras El Ma and Boutrouba forests (Central Middle Atlas, Morocco)

Abstract

The forest trees water requirements are a growing concern in the forest sector due to the growing awareness on the impact of climate change on soil moisture regime. These requirements are still a concern in this area, especially as we search to quantify them over large scale areas and with probable climatic evolutions. The overall objective of this study is to estimate cedar water requirements in the Middle Atlas, in order to identify areas with high pedoclimatic potential for cedar and provide forest managers with new management tools. The specific objective is to search for a simple methodology to estimate cedar water requirements, through the monitoring of water regime, water storage and soil water balance, calculated from rainfall, runoff, evapotranspiration and drainage. Water requirement of different cedar age classes were evaluated in a wet year free from water and heat stress. The water requirements values of 320 mm for a young cedar forest and 460 mm for an adult cedar forest agree with estimates reported in the literature. These values are in the same order of magnitude as the Thornthwaite evapotranspiration deduced from soil water balance, and correspond to the cumulative annual rainfall recorded during the two cedar growth periods described by M'hirit in the Middle Atlas.

Keywords: Water requirements, cedar, Middle Atlas, water balance, soil, evapotranspiration, Morocco.

INTRODUCTION

Dans un environnement changeant et subissant à la fois des effets du changement climatique du au réchauffement de la planète et les changements anthropiques qui sont le plus souvent des changements d'utilisation des terres, la forêt devra faire face à des bouleversements trop rapides pour que leur processus d'adaptation suive le rythme (GIEC, 2007). L'effet du changement climatique est mis en évidence sur les paramètres hydro-climatiques, notamment les baisses des pluies, la hausse des températures et la réduction des débits des cours d'eau.

Les projections de l'évolution du climat prévoient notamment une baisse de 10 à 30 % des précipitations à l'horizon 2100, une hausse des températures de 4 à 5°C dans les régions méditerranéennes, les régions atlantiques ainsi que

le centre du pays (Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement Chargé de l'Environnement, 2016). Les actions anthropiques contribuent également à accentuer les effets du changement climatique par le biais du déboisement, la mauvaise exploitation des sols et de l'eau, l'augmentation démographique, etc... en agissant sur le cycle de l'eau, entraînant ainsi une évolution des débits et des régimes des écoulements, et souvent aussi des eaux de profondeur.

Le réchauffement et la baisse des précipitations ont des répercussions sur la physiologie et la croissance des arbres et vont contraindre le couvert sylvestre à s'adapter, à se déplacer ou à disparaître. Depuis quelques décennies déjà, des sécheresses exceptionnelles poussent certaines de ces forêts au-delà de leurs limites de durabilité. Ces sécheresses, plus accentuées et plus fréquentes, affaiblissent la

¹ Centre de Recherche Forestière, Service d'Écologie, de Biodiversité et de la Conservation des Sols. Avenue Omar Ibn Khattab, B.P. 763, Rabat-Agdal, 10050. Maroc. E-mail : abouazzayna@gmail.com

capacité de résistance des arbres aux agressions d'insectes et d'agents pathogènes et augmentent également la probabilité de méga-incendies (Géli et Soussana, 2015).

Actuellement, les gestionnaires forestiers restent assez démunis en matière de connaissance de la relation eau-sol-plante et notamment d'estimation des besoins en eau des arbres forestiers, dont le cèdre. Ces estimations sont d'autant plus complexes qu'ils doivent également tenter d'esquisser la situation future, en tenant compte des évolutions climatiques probables. Ainsi, la question de la consommation en eau est cruciale pour réussir et orienter le choix en matière de conservation et de réhabilitation des écosystèmes forestiers.

Plus le système aérien des arbres est développé, plus il transpire de l'eau et plus les besoins en eau des arbres sont élevés (ONF, 2007). En France, ces besoins varient selon les essences: au moins 1000 mm d'eau annuellement pour le sapin et l'épicéa, 700 à 1500 mm pour le hêtre, de 500 à 1300 mm pour le pin sylvestre et le mélèze d'Europe, 400 à 700 mm seulement pour le chêne vert, 200 à 500 mm d'eau par an pour la hêtraie, et 240 mm par an pour la peupleraie (Jarny, 2006).

Le cèdre de l'Atlas reçoit des pluies annuelles variant entre 400 et 900 mm (Boudy, 1950; Toth, 1980) au niveau des Aurès (Algérie); 600 mm comme limite inférieure (Le Houerou, 1975), 450 mm et 1500 mm (Putod, 1979), moins de 400 mm à Itzer dans le Sud-Est du Moyen Atlas (Gaussen et al., 1954; Mara, 1973; Martin, 1981; Mezgueldi, 1992), 800 mm et 1500 mm (M'hirith et Benzyane, 2006) dans le Moyen Atlas.

L'altitude, et dans une moindre mesure l'exposition et la position topographique, interviennent sur les besoins en eau des arbres, essentiellement par le biais de leur effets sur les températures et les précipitations. La pente, le degré de tassement des sols et la profondeur de la nappe phréatique, vont influencer la vitesse et le taux de l'infiltration de l'eau et la remontée capillaire dans le sol et vont, par là, modifier le bilan hydrique et ses composantes.

Cedrus atlantica, espèce endémique d'Afrique du Nord, occupe au Maroc une superficie totale d'environ 133.600 ha (M'hirit, 1994). Selon le diagramme d'Emberger, Aussenac (1984) la situe dans les divers étages bioclimatiques: semi-arides à hiver froid et humide, subhumide à hiver froid, humide à hiver froid et humide et humide à hiver frais. Mais, elle trouve son optimum écologique dans le bioclimat méditerranéen humide à hiver froid, voire parfois sous le bioclimat semi-aride supérieur (Abdessemed, 1981; Mezgueldi, 1992).

Cette espèce tolère une large gamme de températures (Boudy, 1950). Dans son aire naturelle, elle croit sous des températures moyennes annuelles comprises entre 7,5 °C et 15 °C (Pujos, 1964; Toth, 1980), avec une moyenne des minimales du mois le plus froid comprises entre -1 °C et -8 °C et une moyenne des maxima du mois le plus chaud pouvant aller jusqu'à +32 °C (M'hirit et Benzyane, 2006). Elle peut résister à des températures allant jusqu'à +41 °C, mais ne peut subsister, en dormance, en dessous de -25 °C (Debazac, 1964).

Du fait de son système racinaire puissant et profond, des sols épais à bonne capacité de rétention en eau peuvent compenser des précipitations plus faibles (Toth et Turrel, 1981). Cette caractéristique confère au cèdre une bonne résistance à la sécheresse. En revanche, le cèdre tolère les sols superficiels calcaires si la roche est fissurée. Par contre, il craint les sols argileux, compacts et hydro-morphes (Courbet et al., 2013; Aoubouazza, 2017).

Le cèdre est capable de maintenir une activité photosynthétique et de transpiration jusqu'à un niveau important de dessèchement du sol (Aussenac et Granier 1978). Cette activité chute dès que le niveau de stress hydrique est de l'ordre de -10 bars (Granier, 1978); mais peut se poursuivre faiblement au-delà de -50 bars (Finkelstein, 1981; Aussenac et Valette, 1982; Aussenac et Finkelstein, 1983; Aussenac 1984; Guehl et al., 1985; Ducrey, 1988; Ducrey, 1994; Abdenbi et al., 2014).

Le comportement du cèdre est similaire à celui du chêne pubescent et du chêne vert, contrairement aux pins qui ferment leurs stomates vers -15 à -17 bars (Aussenac et Valette, 1982). Toutefois, l'absence d'un véritable verrouillage de la transpiration à des niveaux importants de stress hydrique peut avoir pour conséquence des dessèchements de cime. Ces phénomènes confirment que le cèdre n'est pas en mesure d'éviter des dégâts importants dans les situations de sécheresse prononcée.

Le but de cette étude est de parvenir à une estimation appropriée des besoins en eau du cèdre en vue de mieux cerner les régions présentant les potentialités pédo-climatiques favorables pour une meilleure gestion des écosystèmes à la base de cette essence et réussir et orienter le choix des peuplements et, par là, leurs régénération. Elle vise également à proposer une méthodologie simple pour estimer les besoins hydriques du cèdre à travers une approche globale du bilan hydrique du sol en s'appuyant sur les données climatiques disponibles et la variation du stock en eau du sol.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Sites d'étude

La zone d'étude est située dans le Causse moyen-atlasique et plus spécialement au niveau de la forêt d'Azrou. Cette dernière s'étend sur une superficie totale d'environ 17.810 ha dont une superficie boisée de 13.760 ha et 4.040 ha constitués par des clairières. Le cèdre constitue l'essence principale et forme des peuplements purs ou en mélange avec le chêne vert ou d'autres essences secondaires. Ces peuplements purs de cèdre occupent une superficie totale de près de 8.680 ha, soit presque 50 % de la superficie totale de la forêt. Dans cette forêt, un réseau de placettes (Figure 1) parmi les 54 déjà installées par la FAO (2007), a fait l'objet d'un suivi mensuel de l'humidité.

Climat

Le régime des pluies dans cette zone s'articule autour de deux saisons, à savoir un hiver assez froid et pluvieux et un été chaud et sec (Tableau 1). La saison des pluies dure d'Octobre à Mai, tandis que la saison sèche se caractérise par des précipitations orageuses qui sont observées au mois de Juillet et Août.

La hauteur moyenne des précipitations calculée au niveau de l'ensemble du Moyen Atlas tabulaire est d'environ 650 mm/an. La pluviométrie mensuelle moyenne varie entre 9 mm pendant le mois de juillet (le plus sec de l'année) et 113,5 mm pour le mois d'Avril (le mois le plus pluvieux de l'année).

Les chutes de neige surviennent à la mi-automne (Novembre) à la fin d'hiver (Février) et peuvent se prolonger au printemps (Avril) et exceptionnellement au mois de Mai. Les précipitations neigeuses apparaissent à Ifrane à partir de la mi-Décembre, avec une durée moyenne annuelle de 45 jours. Ces précipitations contribuent à l'amélioration du bilan hydrique du sol.

Les hivers sont froids, avec des températures minimales comprises entre -0,5 et -4,7 °C (M'hirit, 1999). Les températures dépendent, plus encore que les précipitations, de la configuration du relief. La température moyenne annuelle est de 13,8 °C au niveau du Causse du Moyen Atlas. Il en résulte que l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle est de 646 mm (Thornthwaite).

Cadre géomorphologique et hydrogéologique

Cette zone est constituée essentiellement de formations calcaires voilées par endroit par des épanchements volcaniques récents (Martin, 1981). Du point de vue hydrogéologique, le Causse moyen atlasique englobe deux aquifères principaux; ce sont l'aquifère des basaltes Quaternaires et celui des calcaires-dolomitiques du Lias.

Les basaltes Quaternaires, constituent un toit relativement imperméable, en comparaison avec les calcaires et dolo-

mies du Lias. Leur présence met en charge les eaux des formations sous-jacentes; ils peuvent aussi contenir des niveaux aquifères dont les caractères hydrogéologiques s'apparentent à ceux des karsts. Les eaux de ces niveaux proviennent en partie du Lias par abouchement latéral et par infiltration superficielle.

L'aquifère liasique se développe au niveau des formations carbonatées à prédominance dolomitique. La nappe se charge à partir des précipitations pluviales et nivales tombant sur le causse.

Caractéristiques pédologiques des sols

Les sols qui se développent sur ces types de roches sont de trois grands groupes suivants (Alaoui; 1990, Chouraichi (2008) (Tableau 2):

- Sols bruns sur basaltes à caractère andin en profondeur (Parcelles 44, 45, 119, 120, 93). Ces sols sont généralement profonds, à horizons supérieurs grumeleux. Ils sont caractérisés par une texture fine;
- Sols développés sur roche calcaire dur qui correspondent au type rouge fersiallitique, c'est-à-dire des sols très rubéfiés, de couleur rouge (Parcelles 10, 18, 29, 59, 62, 100). Ces sols ont une texture fine à très fine dès la surface; leur structure est grumeleuse dans les horizons de surface. Ils sont en général très proches des sols rouges fersiallitiques développés sur roches mères dolomitiques;
- Sols développés sur roches dolomitiques qui correspondent aux sols rouges méditerranéens (Parcelles 73, 74, 78, 94).

Tableau 1: Données de la station climatologique d'Ifrane Aéroport (Est du bassin, Période 1973-2003)

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel ⁽¹⁾
P (mm)	33,2	75,0	102,8	139,3	115,1	124,9	99,5	113,5	61,5	25,8	9,0	13,0	912,6
T (°C)	17,9	12,5	8,1	5,3	4,1	5,5	7,3	8,5	12,1	17,1	21,8	21,9	11,8
ETP (mm)⁽²⁾	86,8	52,0	26,6	15,1	11,3	15,9	27,4	35,8	61,8	96,0	132,8	126,7	688,4

⁽¹⁾ Moyenne (T) ou total annuel (P et ETP),

⁽²⁾ Thornthwaite

Tableau 2: Caractéristiques pédologiques des principaux types de sol considérés sur le bassin du Causse du Moyen Atlas

Sol	119	P28	P18	P59	P62	P73	P120	P94	P93	P10	P45	P100	P29	P87
Profondeur (m)	1,2	1,0	0,6-0,8	0,4-0,6	0,6-0,8	1,0	0,8-1,0	0,8-1,0	1,0-1,2	1,0	0,8-1,0	0,6-0,8	0,6-0,8	0,0-0,2
Texture (%)	42/ 46/ 12	97/ 19/ 2	43/ 38/ 19	46/ 40/ 14	56/ 24/ 19	92/ 5/ 45	1/ 40/ 9	76/ 21/ 3	14/ 53/ 33	20/ 48/ 32	61/ 28/ 11	55/ 41/ 4	-	-
Densité app. (g/cm ³)	0,90	1,30	1,17	1,40	0,90	1,30	0,90	1,40	0,70	1,28	0,74	1,50	1,03	0,79

La texture est exprimée en % de sables, de limon et d'argile

Les densités apparentes sont comprises entre 0,7 et 1,4 g/cm³ avec un maximum de 1,62 g/cm³. Les valeurs les plus grandes (1,30 à 1,62 g/cm³) sont mesurées dans les sols tassés limono-argileux-sableux sur dalle calcaires. Les plus faibles (0,7 à 0,9 g/cm³), sont observées dans les sols vertiques et les andosols, meubles, riches en matière organique, tandis que les valeurs intermédiaires (1,0 à 1,30 g/cm³), se trouvent dans les sables et les rendzines dolomitiques.

La matière organique se présente sous forme d'humus; sa teneur varie selon le type de sol. Elle est élevée pour les sols bruns sur basalte et sur les sols développés sur roches dolomitiques rouges méditerranéens. Par contre, elle est faible dans le cas des sols développés sur roches calcaires dur qui correspondent au type rouge fersiallitiques. La présence de matière organique dans ces sols leur confère des propriétés de porosité et de structure différentes de celles des sols qui en sont dépourvues.

Dans cette forêt, un réseau de placettes (Figure 1) parmi les 54 déjà installées par la FAO (2007), a fait l'objet d'un suivi mensuel de l'humidité des sols.

Description des parcelles (Kerrouani, 1978-79)

La parcelle 28 (compte 23 placettes de 20 ares), d'une superficie de 105 ha, est située à une altitude entre 1600 et 1700 m, sur un plateau avec un versant Nord-Ouest et Sud-Est. Cette parcelle est constituée par un peuplement de cèdre d'âge jeune et adulte en mélange avec le chêne vert et d'autres essences secondaires. La hauteur des arbres du cèdre oscille entre 10 et 20 mètres. Le sol est assez profond.

La parcelle de régénération 59 (compte 20 placettes de 10 ares), d'une superficie de 150 ha, est située à une altitude de 1956 m. Elle repose sur la dorsale calcaire dont la ligne de crête principale dirigée Est-Ouest. Cette parcelle est constituée d'un mélange de cèdre jeune et de chêne vert, avec un taux de recouvrement compris entre 45 à 60 %. La hauteur des arbres du cèdre oscille entre 4 et 8 mètres. Le sol est calcaire pierreux.

Une partie des placettes appartenant aux parcelles 28 (X: 33° 28 mn 29 N; Y: 5° 07 mn 35,8 W; Z: 1707 m) et 59 (X: 33° 26 mn 44,5 N; Y: 5° 03 mn 17,7 W; Z: 1956 m), ont, fait l'objet d'une étude et d'une évaluation précise de leurs bilans hydriques du sol. Le choix de ces deux placettes expérimentales a été effectué, notamment sur la base des critères pertinents suivants: (i) la proximité des stations météorologiques; (ii) l'accessibilité des placettes; (iii) la différence d'altitude des parcelles; et (iv) la représentativité des types de sols.

Travaux réalisés

Travaux de terrains

Tous les profils de sols sont creusés jusqu'à une profondeur de 120 cm minimum, sauf présence évidente d'une dalle ou d'une roche dure de dolomie ou de basalte non défonçable. Leur description a été faite sur la base des profondeurs de prélèvements des échantillons de sols, leurs couleurs (définie à l'aide du code de Münsel à l'état humide), la structure et la texture.

Sur ces profils, les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués, chaque mois, et ont concerné les horizons 0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm et 90-120 cm, à raison de près de trois échantillons de sol par profil en moyenne, soit un total de 39 échantillons.

Analyses de laboratoire

Les échantillons de sols prélevés des 15 profils sont d'abord laissés sécher à l'air libre. Ils sont ensuite broyés au mortier et réduits en poudre homogène (< 2 mm). En cas de présence d'agrégats, leur dislocation nécessite l'utilisation de l'eau oxygénée et de l'acide chlorhydrique pour détruire les ciments organiques et minéraux.

Ces échantillons de sols ainsi broyés et disloqués, on procède ensuite à un tamisage avec un tamis de 2 mm. Ainsi, on sépare la terre fine des cailloux et des graviers. Le protocole détaillé de la préparation a largement été décrite par Baise (2000).

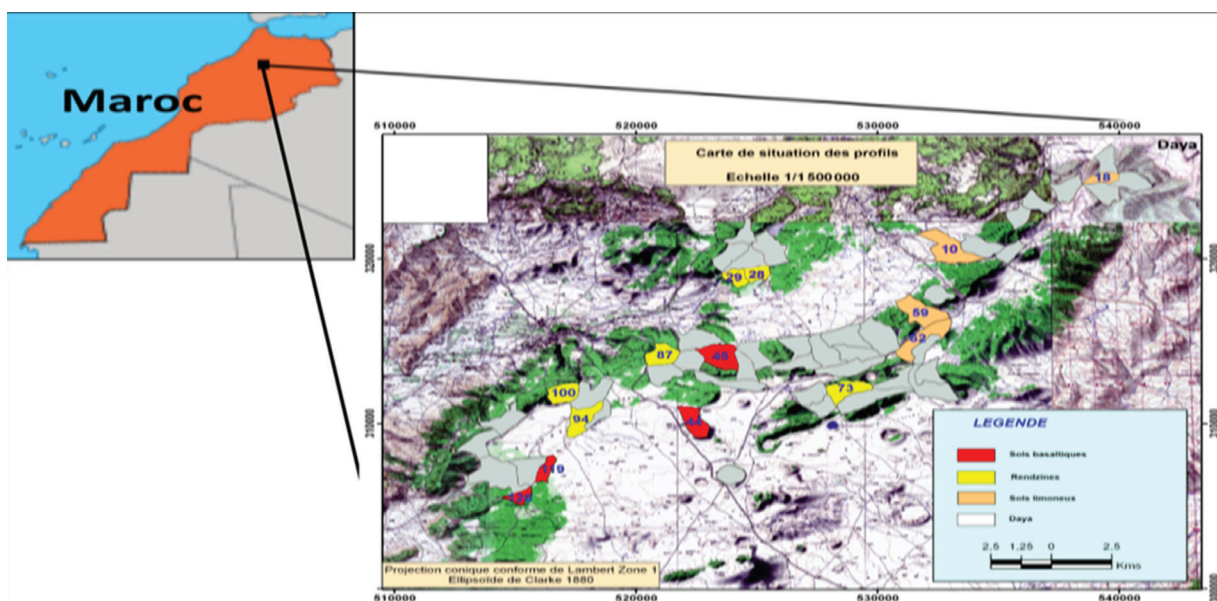


Figure 1: Situation de la zone d'étude

L'analyse granulométrique à 5 fractions des échantillons de sols a été réalisée après attaque de la matière organique à l'eau oxygénée. La séparation des particules supérieures à 0,05 mm, s'effectue par tamisage. Pour séparer et classer les particules plus fines, la méthode utilisée est celle de la pipette Robinson, qui est basée sur la loi de Stokes (Bruand et Chenu, 1994). La matière organique est déterminée par la méthode de Walkley et Black (1934). Son taux est estimé en multipliant le % de carbone organique par 1724.

L'humidité équivalente est déterminée à l'aide de d'une centrifugeuse à 1000 g. L'humidité au point de flétrissement est déterminée à l'aide d'une presse à membrane en appliquant une pression de 15 bars.

Réserve utile des sols

La réserve utile en eau des sols à différentes profondeurs (exprimée en mm d'eau par centimètre de sol), est la quantité d'eau entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. Elle correspond à la quantité d'eau maximale que le sol peut stocker et restituer à la plante. Son calcul prend en compte l'épaisseur totale de sol exploitable par les racines fines, la texture et la présence d'éléments grossiers rocheux ou de forte proportion de cailloux. Pour des raisons pratiques, la réserve utile a été calculée en utilisant le triangle textural (Figure 2) élaboré par Jamagne M., et al. (1977).

La réserve utile maximale s'exprime également en fonction de l'épaisseur totale de sol exploitable par les racines fines, et la densité apparente sèche du sol. L'humidité du sol est exprimée en terme pondéral.

$$RU \text{ max} = (H_{cc} - H_{pf}) \times D_a \times Z \text{ mm}$$

(RU max: Réserve utile maximale (mm); H_{cc}: Humidité à la capacité au champ; H_{pf}: Humidité au point de flétrissement; D_a: Densité apparente; et Z: Profondeur utile du sol (mm)).

Suivi du régime hydrique et du Stock en eau du sol

L'humidité des sols a été mesurée *in-situ* directement à l'aide de la méthode gravimétrique. Elle est exprimée comme le rapport sans dimension de la masse d'eau à la masse de sol sec ou de volume d'eau au volume total de sol. Ce rapport est habituellement multiplié par 100 et présenté en pourcentage massique ou volumique. L'humidité pondérale a été calculée par la formule:

$$\text{Humidité (\%)} = 100 \times [(P_H/P_S) - 1]$$

P_H: Poids humide et P_S: Poids sec.

Le poids humide est déterminé sur le terrain par une balance portative haute précision ($\pm 0,1$ g). Les échantillons de sols sont séchés à l'étuve et pesés pour avoir le poids sec. Ainsi, sur les huit campagnes de mesures de l'humidité des sols (entre Mai et Décembre 2009 année humide), qui ont été effectuées, un total de 312 échantillons analysés.

Le stock d'eau est donné par la formule:

$$\Delta S = H_v (H_p (\%) \times D_a) \times Z (\text{mm})$$

H_p: Humidité pondérale; H_v: Humidité volumique; D_a: densité apparente; Z (mm): Épaisseur du sol (zone racinaire)

L'analyse de l'évolution l'humidité volumique présentée montre qu'elle a tendance à diminuer depuis le mois de mai pour la majorité des sols de la zone. Cette diminution est moins importante pour les sols fersiallitiques argileux.

Calcul du bilan hydrique

L'équation du bilan hydrique est exprimée par l'équation suivante:

$$\Delta S = P_e - (ET + R + D) \quad (1)$$

P: Précipitation (mm); ETP = Évapotranspiration potentielle (mm) calculée à l'échelle mensuelle par le bilan hydrique de Thornthwaite; I = Infiltration (mm) et R = Ruissellement (mm)).

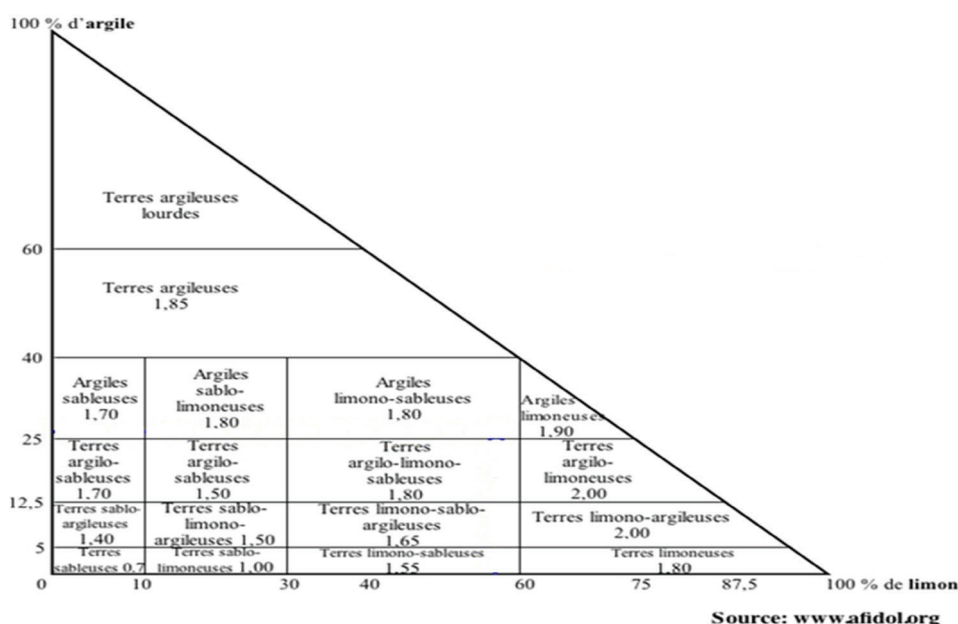


Figure 2: Triangle textural (Jamagne et Bretemieux, 1997)

Le ruissellement peut être considéré comme négligeable en raison de l’affleurement des terrains carbonatés fracturés qui favorisent l’infiltration, et du faible développement du réseau hydrographique dont l’écoulement est le plus souvent temporaire (Amraoui, 2005). Dans ce cas, l’infiltration des eaux est obtenue par la formule simplifiée:

$$P = R + I + \Delta S + D \quad (2)$$

L’ETP et l’ETR, évapotranspiration potentielle et réelle, ont été calculées à l’échelle mensuelle par le bilan hydrique de Thornthwaite). Dans ce cas, l’équation 2 devient:

$$\Delta S = P - D \quad (3)$$

Le bilan hydrique a été évalué en année humides pour la station Ras el Ma et Boutrouba.

Tableau 3: État comparatif de la réserve utile en eau des différents profils des sols étudiés

Placette	Type de sols	Série	Da	Hcc	Hpf 4.2	Profondeur (m)	RU (mm)				
93[0-20/25 cm] [20/25-65/70 cm] [65/70-100+ cm]	Vertique	Très Profond	0,73	48,1	31,8	100+	143				
0,83			37,8	23,2							
0,88			36,9	20,3							
62[0-45/50 cm] [45/50-85/90 cm]	Vertique	Très Profond	0,73	38,5	27,2	0,8 à 1,0	158				
0,83			35,7	27,2							
0,83			31,7	22,4							
119[0-12/15 cm] [12/15-45 cm] [45 – 100 cm]	Andosol	Profond	0,62	73,2	50,2	1,0	86				
0,93											
0,90											
44[0-12/15 cm] [12/15-45 cm] [45 – 100 cm]	Andosol	Profond	0,74	73,2	50,2	1,0	86,0				
0,82											
0,68											
45[0-12/15 cm] [12/15-45 cm] [45 – 100 cm]	Andosol	Peu profond	0,74	73,2	50,2	1,0	86				
0,82											
0,68											
120[0-15/30 cm]	Andosol	Peu profond	0,62	48,4	21,7	0,8	39				
59[0-15/20 cm] [15/20-55/60cm]			Calcaire	Moyennement à peu profond	1,29	57,8	46,5	0,3	69		
1,37											
87[0-10/25 cm]	0,79	44,2			25,6					20	29
29[0-15/20 cm] [15/20-45/50cm]	Calcaire	Moyennement à peu profond	1,12	33,3	23,9	0,5	67				
1,46											
18[0-15/20 cm] [15/20-55/60 cm] [55/60-120 cm]			1,13					42,0	29,7	1,0 -1,20	151
1,17	35,6	24,3									
1,16	30,8	21,2									
10m [0-12 cm] [12-35/40 cm]	Calcaire	Moyennement à peu profond	1,30	44,8	29,1	0,6	106				
1,26											
28 [0-15/20 cm]			Rendzine					Peu profond	1,33	36,9	24,7
100 [0-15/30 cm]	1,40	36,9		24,7	0,3	37					
73[0-12 cm] [12-40 cm] [40-100+ cm]	Dolomie sableuse	Profond		1,30	45,0	29,7	0,8 à 1,0		58,1		
1,41			24,5	15,9							
1,50			9,8	3,1							
94[0-12 cm] [12-40 cm] [40-100+ cm]	Dolomie sableuse	Profond	0,7	45,8	31,4	0,8 à 1,0	34				
1,16			12,9	7,1	13						
0,86			6,2	3,3	4,0						

les rendzines dolomitiques (2 à 6 %) peu profonds à grains ± grossiers. Ainsi, l'augmentation de la teneur en eau dans le sol est en relation avec la texture. Dans le premier cas, les sols renferment des éléments fins argileux et contiennent des teneurs élevées en matière organique. Tandis que dans le second cas, ils sont riches en sables à grains ± grossiers et renferment de faibles teneurs en matière organique. C'est le caractère andosolique du sol (matière organique et allophanes), qui jouent pour garder l'humidité.

Variation du stock en du sol

Le stock d'eau du sol varie d'un mois à l'autre et est liée aux apports d'eau de pluie ainsi qu'à la nature de sol et du substrat (Figure 4). Ce stock diminue de Juin à Septembre, passe par un minimum pendant le mois d'Août et entame son ascension à nouveau à partir du mois de Septembre.

Une augmentation est cependant enregistrée dans les niveaux profonds des sols des trois parcelles (62, 73 et

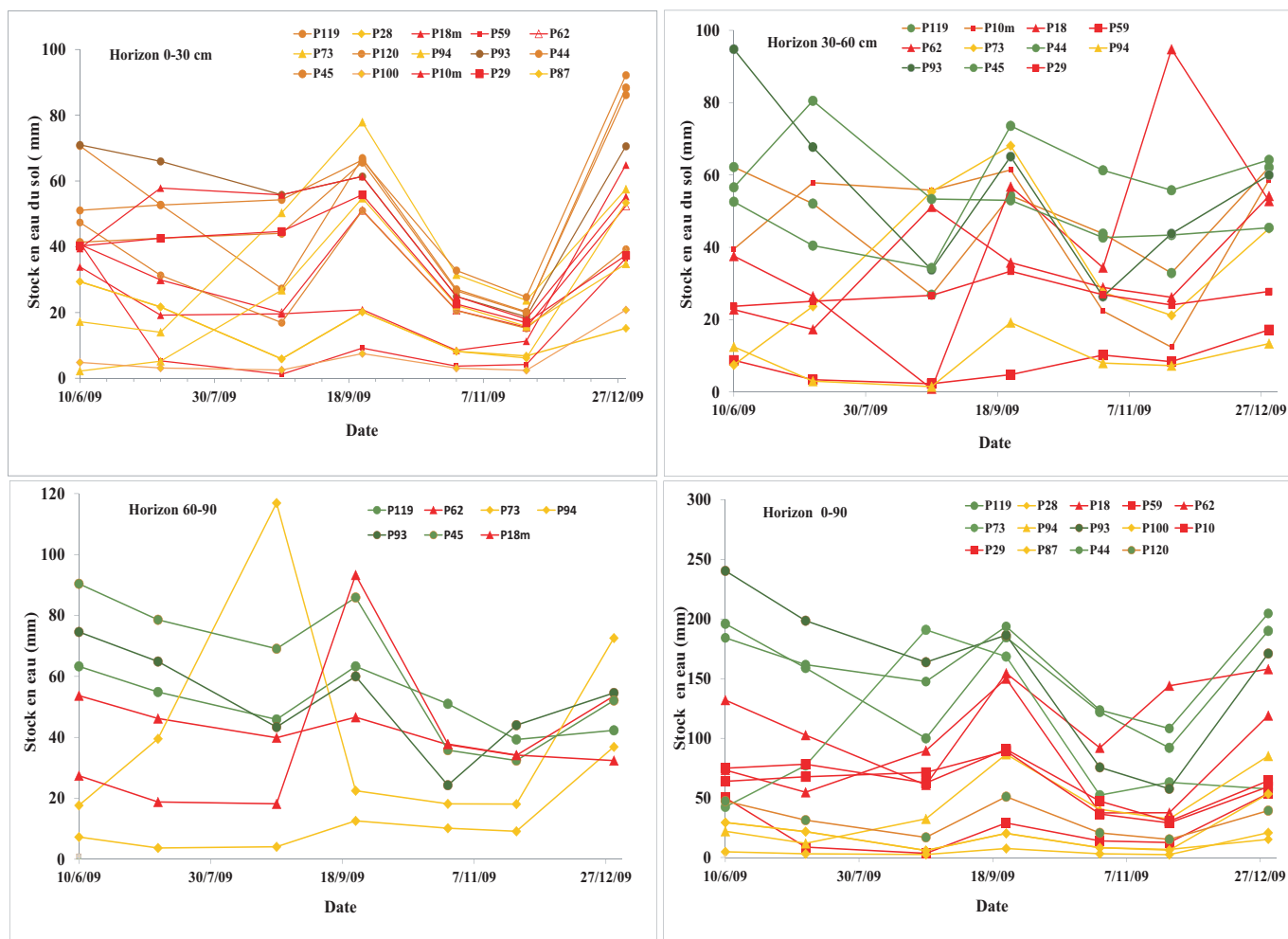


Figure 4: Variation du stock en eau du sol

Tableau 4b: Pluviométrie (mm): Forêt Boutrouba

Mois	2002-03		2003-04		2004-05		2005-06		2006-07		2007-08		2008-09		2009-10	
	p.mois	cuml	p.mois	cuml	p.mois	cuml	p.mois	cuml	p.mois	cuml	p.mois	cuml	p.mois	cuml	p.mois	cuml
Sept.	5,5	0,0	0,0	42,8					1,5	21,0	109,5	198,0				
Oct.	110,0	115,5	19,0	19,0	69,7	69,7	121,0	163,8	9,0	10,5	69,5	90,5	141,4	250,9	80,0	278,0
Nov.	255,8	371,3	108,1	127,1	95,1	164,8	174,0	337,8	36,2	46,7	77,0	167,5	255,2	506,1	60,0	338,0
Déc.	85,5	456,8	286,7	413,8	130,1	294,9	88,0	425,8	58,0	104,7	15,0	182,5	202,0	708,1	523,0	861,0
Janv.	130,0	586,8	1,8	415,6	197,0	491,9	131,0	556,8	35,8	140,5	61,0	243,5	243,0	951,1	300,0	1161,0
Fév.	36,0	622,8	105,6	521,2	108,9	600,8	151,0	707,8	62,2	202,7	109,2	352,7	105,0	1056,1	407,0	1568,0
Mars	105,8	728,6	40,6	561,8	33,4	634,2	127,0	834,8	67,1	269,8	15,2	367,9	128,2	1184,3	250,0	1818,0
Avril	110,6	839,2	81,4	643,2	-	634,2	79,0	913,8	139,8	409,6	60,3	428,2	12,0	1196,3	115,0	1933,0
Mai	30,0	869,2	79,0	722,2	-	634,2	104,0	1017,8	23,5	433,1	67,5	495,7	70,0	1266,3	32,0	1965,0
Juin	42,9	912,1	3,2	725,4	49,3	683,5	36,0	1053,8	8,0	441,1	-	495,7	15,5	1281,8	23,0	1988,0
Juil.	22,5	934,6	-	725,4	70,0	753,5	19,6	1073,4	-	441,1	25,0	520,7	11,1	1292,9	26,0	2014,0
Août	18,0	952,6	-	725,4	10,0	763,5	4,0	1077,4	7,8	448,9	11,0	531,7	5,5	1298,4	46,0	2060,0

94), situées en bas de pente, en Août, par rapport aux mois précédents de Juin-Juillet. Cette augmentation pourrait s'expliquer par le ressuyage lent à très lent au niveau de ces sols argileux. Ainsi, les premiers sont meubles, riches en sables et sont dotés d'un bon drainage, tandis que les derniers sont tassés, renferment des teneurs élevées en éléments fins, et sont caractérisés par une capacité élevée de rétention en eau.

Physiologie du cèdre

Dans les régions du Moyen Atlas, M'hirit (1982) a observé que le cèdre montrait deux périodes de croissance par an: la première qui s'étale de mi-Avril au début Juillet et la seconde période de croissance qui s'étend de fin Septembre à fin Octobre. On conçoit facilement que si le sol n'est pas en mesure de répondre aux besoins de l'arbre du fait du stress hydrique et thermique, la croissance de celui-ci en sera affectée. Nous avons vu par exemple, que les aiguilles du cèdre développées pendant l'année sèche 2007, semblent avoir eu une elongation plus faible. Par contre un maximum, en années humides (2009-2010). Les pluies enregistrées annuellement pendant les deux périodes de croissance du cèdre s'élèvent à environ de 320 à 340 mm.

Bilan hydrique du sol

Grâce aux profils hydriques de 2009, et avec l'aide des relevés pluviométriques disponibles au niveau des stations météorologiques de Ras El Ma et de Boutrouba (Tableaux 4a et 4b), nous avons évalué les besoins en eau du cèdre en s'appuyant sur le calcul du bilan hydrique du sol (Tableaux 5a et 5 b).

Pour la placette constituée d'arbres jeune de la station Ras El Ma et si on considère le profil hydrique du sol en Décembre 2009 (Figure 6a), on constate qu'à cette date celui-ci a atteint une humidité proche de la capacité de rétention sur une profondeur d'au moins 30 cm, le reste du profil étant toujours à une humidité inférieure à 4 % du fait de la faible teneur en argiles. Or, à cette même date (Tableau 4a), le cumul d'eau de pluie totale est de 685 mm, depuis la fin de la saison sèche. Comme 70 mm d'eau, suffisent théoriquement pour amener 1 m de sable à la capacité de rétention (Sauvageot, 1973), 685 mm de pluie auraient dû amener environ 9 à 10 m de sable à ce même taux d'humidité, soit l'ensemble des horizons aquifères.

La différence, entre les profondeurs d'humectation théoriques et réelles, traduit la consommation en eau du cèdre. On peut donc admettre qu'environ 660 mm d'eau ont été évapotranspirées, dont éventuellement une fraction d'eau drainée. Si on admet que la pluie efficace moyenne dans le Causse est estimée à un taux moyen de 50 % (Amraoui, 2005), soit environ 330 mm d'eau sont infiltrées, la quantité d'eau consommée par l'évapotranspiration réelle est donc d'environ 330 mm.

On peut néanmoins, en déduire, que c'est surtout pendant la période qui suit la fin de la saison sèche que la consommation en eau est importante. En hiver, les besoins en eau du cèdre diminuent et parallèlement le sol, peut s'humidifier en profondeur du fait du taux élevé de drainage.

Pour un arbre adulte, la masse foliaire intercepte les précipitations. Une grande partie de l'eau de pluie (près de 30 %) est retenue par les arbres et n'atteindra pas le sol. Dans ces conditions, près du tiers des pluies efficaces, soit environ 240 mm d'eau est infiltrée, la quantité d'eau évapotranspirée est donc de 440 mm.

Tableau 5a: Bilan hydrique d'une rendzine dolomitique en 2009 (Ras El Ma)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
	Total												
Pluie mm	361	138	194	21	95	41	11	6	123	71	74	417	1552
ETP mm	29	21	29	29	41	51	52	56	56	47	31	26	468
P-ETP	332	117	165	-8	54	-10	-41	-50	67	24	43	391	-
Saturation	100	100	100	92	100	90	49	0	67	91	100	100	-
ETR	29	21	29	29	41	51	52	55	56	47	31	26	467
P - ETR	332	117	165	0	54	0	0	0	67	24	43	391	1193
Recharge	361,5	224,5	141	82,5	27	27	0	0	33,5	45,5	33,5	217	1193

Tableau 5b: Bilan hydrique d'un sol calcaire en 2009 (Forêt Boutrouba)

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
	Total												
Pluie mm	243	105	128	12	70	16	11	6	198	80	60	523	1452
ETP mm	0	3	25	33	54	72	87	90	56	52	29	14	513
P-ETP	243	102	103	-21	16	-56	-76	-84	142	28	31	522	-
Saturation	100	100	100	79	95	39	0	0	100	100	100	100	-
ETR	0	3	25	33	54	72	50	6	56	52	29	14	394
P - ETR	243	102	103	0	16	0	0	0	142	28	31	522	1187
Recharge	382,5	172,5	102,5	51,5	8	0	0	0	71	14	29,5	276,5	1108

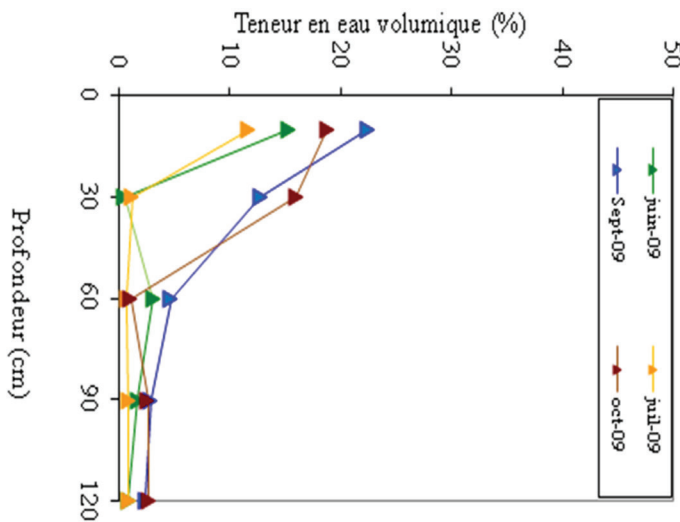


Figure 5a: Variations, en fonction de la profondeur, de l'humidité d'un sol sableux

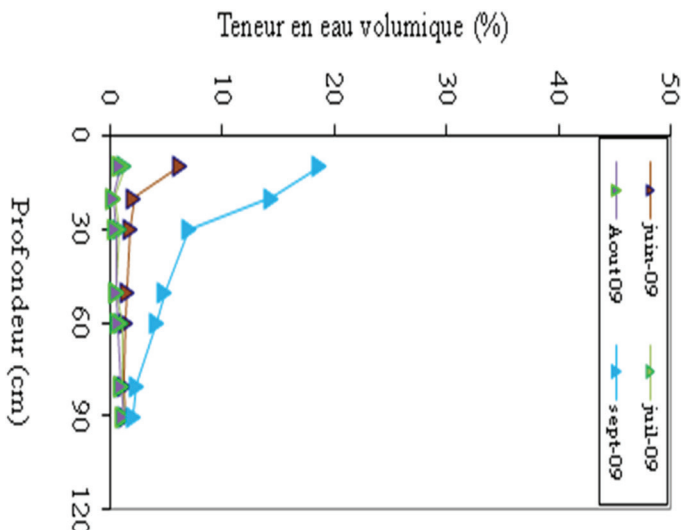


Figure 5b: Variations, en fonction de la profondeur, de l'humidité d'un sol calcaire

Considérons maintenant le profil hydrique de fin Décembre 2010 (Tableau 4b), nous voyons que l'ensemble du profil a atteint la capacité de rétention (mais il n'y a pas accumulation d'eau à la surface). Les relevés pluviométriques donnent un total de 650 mm de pluies tombées depuis le mois de Septembre 2009. En appliquant le même raisonnement que précédemment, on en déduit qu'il faut environ 360 mm de pluie pour amener l'ensemble des horizons du sol, à la capacité de rétention de 4%. On peut donc dire qu'environ 320 mm d'eau ont été évapotranspirées. Ces valeurs consommées par un arbre jeune et un arbre adulte sont du même ordre de grandeur que celles calculées précédemment. Elles correspondent au cumul des pluies enregistrées durant les deux périodes de croissance du cèdre observées par M'hirit (1994).

Pour la station de Boutrouba, la consommation en eau du cèdre est nettement plus faible (360 mm). Les sols limono-argileux, reposant sur la dalle calcaire sont caractérisés par une densité élevée (1,29 à 1,37 g.cm⁻³) comparée aux sols sableux de la parcelle précédente 28, ce qui réduit la croissance racinaire (Atkinsom, 1980).

Les racines des arbres poussant dans des zones compactées peuvent être jusqu'à 70 % plus courtes que celles d'un sol non compacté en plus d'être plus épaisses. En outre, la dalle calcaire de densité élevée (1,62 g.cm⁻³), constitue un obstacle évident. Quand les racines rencontrent une telle barrière, elles ont tendance à plier ou à se ramifier abondamment et continuent à pousser à l'horizontal au-dessus de cette barrière (Montagu et al., 2001), ce qui réduit drastiquement la réserve utile qu'elles peuvent exploiter (40,5 mm).

CONCLUSIONS

L'étude a consisté à rechercher une méthodologie simple pour estimer les besoins en eau du cèdre dans le Moyen Atlas marocain à travers le suivi du régime hydrique, du stock en eau et du bilan hydrique du sol calculé à partir des précipitations, du ruissellement, de l'évapotranspiration et du drainage. Ces besoins en eau du cèdre de différentes classes d'âge ont été évalués en année humide. Les valeurs estimées des besoins en eau annuels sont de 320 mm pour une forêt de cèdre jeune et de 460 mm pour une forêt de cèdre adulte, en concordance avec les résultats avancés dans la littérature (Gaussien et al., 1954; Mara, 1973; Puto, 1979; Martin, 1981; Abdessemed, 1991). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que l'évapotranspiration réelle Thornthwaite déduite du bilan hydrique du sol, et correspondent au cumul des pluies enregistrées en année humide durant les deux périodes de croissance du cèdre observées par M'hirit (1994) dans le Moyen Atlas.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier MM. Marcel Kuper (CIRAD UMR G-eau, TAC-90/15 L'Hortus 73 rue JF Breton 34398 Montpellier cedex 5, France), Ahmed Bouaziz et Ahmed Bamouh, tous deux Pr. en Production Végétale à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Madinat Al Irfane, BP 6202-Instituts, 10112-Rabat, Maroc), d'avoir accepté à lire et à apporter les remarques pertinentes à ce présent article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdenbi Z., Lamhamedi S.M., Taoufik A. (2014). Relations hydriques des arbres sains et dépérissants de *Cedrus Atlantica* M. au Moyen Atlas Tabulaire au Maroc. *Géo-Eco-Trop.* 37: 157 -176.
- Abdessemed K. (198). Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) dans les massifs de l'Aurès et Belezma (Algérie): Etude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement, Thèse de Docteur Ingénieur, Université Aix-Marseille, France, 199p.
- Alaoui M.A. (1990). Contribution à l'étude du fonctionnement d'un écosystème forestier méditerranéen: application à la phytoécologie et à la productivité du Cèdre (*Cedrus atlantica*) dans les forêts du Moyen-Atlas. Thèse de doctorat, Université Nancy 1, 295 p.
- Amraoui F. (2005). Contribution à la connaissance des aquifères karstiques: cas du Lias de la plaine du Saïss et du Causse moyen Atlasique Tabulaire (Maroc). Thèse d'état, Université Hassan II, Casablanca, Maroc, 258p.

- Aoubouazza M. (2017). Influence des propriétés hydrodynamiques du sol sur la sensibilité au dépérissement du cèdre dans le Causse moyen-atlasique central marocain. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vet* 5:293-303.
- Atkinson (1980). Arbres et arbustes à utiliser par la végétation des terrains réhabilites par analyse de risque in Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2017- 34 p.
- Aussenac G., Granier A.(1978). Physiologie des arbres et arbustes en zones arides et semi-arides : *Ann. Sci. for.*, 35, 19-32.
- Aussenac G., Valette, J.C. (1982). Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux *Ann. Sci. For.* 39: 41-62.
- Aussenac G., et Finkelstein (1983). Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre. *Ann. For. Sci.* 40: 67-77.
- Aussenac G., (1984). Le Cèdre, essai d'interprétation bioclimatique et écophysiological. *Bull. Soc. bot. Fr.*, 131, *Actualités Botaniques*, 131: 2-4, 385-398,
- Baize D. (2000). Guide des analyses en pédologie : choix, expression, présentation, interprétation. 2ème édition. Paris, Institut National de Recherches Agronomiques.
- Boudy P. (1950). Économie forestière Nord Africaine. Tome II, monographie et traitement des essences forestières. Fasc. I. Édit. Larousse, Paris.
- Bruand A., Chenu C., (1994). Constitution physique du sol. *Techniques agricoles*, n° 1130, 12 p.
- Courbet F., Lagacherie M., Marty P., Ladier J., Ripert C., Riou-Nivert P., Huard F., Debazac E.F. (1964). Manuel des Conifères; ENGREF, Nancy.
- Ducrey M. (1994). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus Atlantica* Manetti) au climat méditerranéen: aspects écophysiological de sa réaction à la sécheresse. *Ann. Rech. For. Maroc*, T (27), 139-153
- Ducrey M. (1988). Réactions à la sécheresse de quelques espèces forestières méditerranéennes. *Revue Forestière Française XL* 5 359-370.
- Finkelstein D. (1981). Influence des conditions d'alimentation hydrique sur le débourrement et la croissance de jeunes plants de cèdres (*Cedrus atlantica* Manetti) cultivés en serre. *Annales des Sciences forestières*, 38: 109-126.
- Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA, 1981): Synthèse des travaux de la commission de cartographie 1970-1981, Doc. Multicopié, 20 p
- Aussenac G., Guehl J.M. (1994). Dépérissement et accidents climatiques. *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, pp. 458-470.
- Chouraichi M. (2008). Étude pédologique des forêts d'Azrou et Ait Youssi Lamekla. Étude des causes du dépérissement de la cédraie du Moyen Atlas (Ifrane). Convention FAO/UTF/MOR/028/MOR - HCEFL-CD, Maroc, 2008.
- Kerrouani H. (1978-79): CRIA de Meknès, Description parcellaire de la forêt d'Azrou-Ifrane.
- Géli H., Soussana J. (2015). Le changement climatique ce qui va changer dans mon quotidien. Éditions Quæ. RD 10, 78026 Versailles Cedex, France
- GIEC (2003). Les changements climatiques et la biodiversité» constate et tente de prévoir les conséquences du réchauffement sur l'environnement. Le document technique du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Témoignage, le Monde.
- GIEC (2007a). «Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers». Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change, website : www.ipcc.ch.
- GIEC (2007b). «Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability». Summary for policymakers. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change, website: www.ipcc.ch.
- Guehl J.M., Aussenac G., De Vitry C. (1985). Photosynthèse hivernale du Douglas vert (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) et du Cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti et *Cedrus libani* Loud.). Essai de modélisation à l'échelle du rameau. *Acta Oecologica Oecologia Plantarum*, 6:139-160.
- Jamagne M., Bétrémieux R., Bégon J.C., Mori A. (1977). Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Tech. Inf.* 324-325: 627-641.
- Jarny B. (2006). <http://www.crfp-poitou-charentes.fr/Les-peupliers-consomment-moins-d.html>
- Lehouérou H.N., (1975): Problèmes et potentialités des terres arides du Nord de l'Afrique. *Options Médit.*, 28: 17-21.
- Lecompte M., Lepoutre B. (1975). Bilan de l'eau et conditions d'existence de la cédraie dans le Moyen-Atlas basaltique- utilisation d'une analyse de l'information mutuelle entre les espèces et les variables du milieu. *Ann. Rech. Forest. Maroc*, Tome 15 pp. 149-269.
- Martin J. (1981). Le Moyen Atlas central : étude géomorphologique. *Notes et mémoires du service géologique* N° 258 bis. 445 p.
- M'hirit O. (1999). Le cèdre de l'Atlas à travers le réseau Silva Méditerranéa «Cèdre». Bilan et perspectives. *Forêt méditerranéenne*, Tome XX, n° 3, pp. 91-100.
- M'hirit O., Benzyane M. (2006): Le Cèdre de l'Atlas. Mémoire du temps. Éditions La croisée des chemins. 288 p.
- Mezgueldi A. (1992). Étude dendrochronologique du cèdre dans la forêt d'Iltzer et Kerrouchen. Mém. Fin d'étude. IAV Hassan II, 142 p.
- M'hirit O., (1982). Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain: Essai sur une approche multidimensionnelle de la phyto-écologie et de la productivité du cèdre. Thèse de Doctorat es Science, Univ. Dr. Eco. Sci. Aix-Marseille, 436 pages.
- M'hirit O. (1994). Croissance et productivité du cèdre de l'Atlas : Approche multidimensionnelle de l'étude des liaisons
- Ministère Délégué auprès du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement Chargé de l'Environnement (2016). Rapport 3^{ème} Communication Nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

- Molinier R. (1954). les climax côtiers de la méditerranée occidentale. lab. Biologie. Végétale. Fac. des sciences, Marseille, Vol. IV, fasc. 5, p. 284-308.
- Montagu K.D., Conroy J.P., Atwell B.J. (2001). The Position of Localized Soil Compaction Determines Root and Subsequent Shoot Growth Responses », *Journal of Experimental Botany* 52: 2127-2133.
- Office National des Forêts (2007). Les arbres, grands amateurs d'eau http://www.onf.fr/gestion_durable/sommaire/milieu_vivant/ecosysteme/elements
- Pujos A., (1964). Les milieux de la cédraie marocaine. *Ann. Rech. For. Maroc.* 6: 211 p.
- Putod R., (1979). Le cèdre de l'Atlas en France. *Bull de vulgarisation*, 75 p.
- Sauvageot A. (1973). Recherches sur la nutrition minérale de *Pinus Pinaster* en forêt de la Mamora. *Ann. Rech. For. Maroc.* 13: 5-62.
- Toth J., (1980). Le cèdre dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans deux autres pays a grande importance forestière. *Forêt méditerranéenne*. Tome II. No. 1.
- Toth J., Turrel M. (1981). Croissance radiale et longitudinale de quelques résineux en fonction de l'alimentation en eau. INRA. Mitteilungen des forstlichen Bundesversuchanstalt in Wien. Symposium IUFRO La croissance des arbres en diamètre. Innsbruck 9-12/09/1980 177-192.
- Walkey A. and Black I.A., (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 34, 29-38.
- Thorntwaite C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *The geographical Review*, Vol. XXXVIII, 1948, n°1, p.55-94.