

Détermination des paramètres d'évaluation du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers (*Cedrus atlantica* Manetti, cèdre de l'Atlas au Maroc) : méthodes spécifiques et génériques

Mohamed EL MDERSSA^{1,2}
Fouad MALKI^{2,3}
Hicham IKRAOUN^{1,2}
Laila NASSIRI¹
Jamal IBIJBIJEN¹

¹ Université Moulay Ismail
Laboratoire « Environnement et ressources microbiennes et végétales »
Marjane 2, BP 298, Meknès 50050
Maroc

² Département des Eaux et Forêts
Maroc

³ Université Ibn Tofail
Faculté des sciences humaines et sociales, Département de géographie
Laboratoire « Environnement, Sociétés, Territoires »
BP 242, Kénitra
Maroc

Auteur correspondant /
Corresponding author:
Mohamed EL MDERSSA –
elmderssa.enfi@gmail.com



Photo 1.
Peuplement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) de la forêt d'Azrou.
Stand of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in the Azrou forest.
Photo M. El Mderssa.

Doi : 10.19182/bft2022.351.a36330 – Droit d'auteur © 2020, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 4 février 2021 ; date d'acceptation : 2 septembre 2021 ; date de publication : 1^{er} février 2022.



Licence Creative Commons :
Attribution - 4.0 International.
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

Citer l'article / To cite the article

El Mderssa M., Malki F., Ikraoun H., Nassiri L., Ibjibijjen J., 2022. Détermination des paramètres d'évaluation du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers (*Cedrus atlantica* Manetti, cèdre de l'Atlas au Maroc) : méthodes spécifiques et génériques. Bois et Forêts des Tropiques, 351 : 67-77. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.351.a36330>

RÉSUMÉ

Détermination des paramètres d'évaluation du stock de carbone dans les écosystèmes forestiers (*Cedrus atlantica* Manetti, cèdre de l'Atlas au Maroc) : méthodes spécifiques et génériques

La quantification du carbone emmagasiné dans les écosystèmes forestiers et de son équivalent en CO₂ constitue un impératif pour une estimation fiable de la contribution de ce puits de carbone dans la limitation des émissions de gaz à effet de serre. La présente étude vise dans un premier temps, par une étude de terrain, à évaluer le volume de bois sur pied et à estimer la quantité de carbone contenue dans les parties aériennes et racinaires, tout en déterminant le facteur d'expansion et de conversion de la biomasse (FECB) spécifique du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) situé dans la zone du Moyen Atlas central. D'autre part, les résultats obtenus ont été comparés à ceux provenant de l'utilisation des paramètres génériques du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 2006. Le volume de bois sur pied et la biomasse aérienne ont été déterminés en utilisant des tarifs de cubage et des modèles de biomasse développés à partir des mesures directes du poids sec et du volume sur 30 arbres échantillonnés et prélevés dans chaque forêt de la zone d'étude. Le volume et la biomasse aérienne ont été évalués respectivement à 3 321 284 m³ et à 1 179 188 t de matière sèche. Le FECB, déterminé par le rapport entre le volume et la biomasse, est de 0,36 tMS/m³, valeur inférieure à celle estimée par le GIEC (0,55 tMS/m³). La fraction de carbone (FC), issue de la calcination des échantillons de bois prélevés, est de l'ordre de 0,5643 tC/tMS. Elle est supérieure à la valeur donnée par le GIEC (0,51 tC/tMS). Au final, la quantité de carbone contenue dans l'écosystème étudié est de 858 387 t de matière sèche contre 1 201 789 t estimées à partir des paramètres du GIEC.

Mots-clés : carbone, GES, FECB, biomasse, fraction de carbone, GIEC, changements globaux, Maroc.

ABSTRACT

Determining parameters to assess carbon stocks in forest ecosystems with *Cedrus atlantica* Manetti (Atlas Cedar) in Morocco: specific and generic methods

Quantifying the amounts of carbon stored in forest ecosystems and their CO₂ equivalent is essential to make reliable estimations of the contribution of this carbon sink in limiting greenhouse gas emissions. With this study, we aimed, firstly, to evaluate the volume of standing wood through field surveys in the central Middle Atlas zone, and thus to estimate the quantity of carbon contained in the aerial and root parts while determining the specific Biomass Conversion and Expansion Factor (BCEF) of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) in this region. Secondly, we compared our results with those obtained using the generic parameters issued by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 2006. Standing volume and above-ground biomass were determined using volume tables and biomass models developed from direct measurements of dry weight and volume taken from 30 sample trees in each forest in the study area. Volume and above-ground biomass were estimated, respectively, at 3,321,284 m³ and 1,179,188 t dry matter. The BCEF, determined by the ratio of volume to biomass, was found to be 0.36 tMS/m³, which is lower than the IPCC estimation (0.55 tMS/m³). The carbon fraction (CF), resulting from calcination of the wood samples taken, is around 0.5643 tC/tMS, which is higher than the IPCC figure (0.51 tC/tMS). Finally, the quantity of carbon contained in the ecosystem studied is 858,387 t of dry matter compared to 1,201,789 t estimated with the IPCC parameters.

Keywords: carbon, GHG, BCEF, biomass, carbon fraction, IPCC, global change, Morocco.

RESUMEN

Determinación de los parámetros de evaluación de las reservas de carbono en los ecosistemas forestales de *Cedrus atlantica* Manetti (cedro del Atlas) en Marruecos: métodos específicos y genéricos

Es necesario cuantificar el carbono almacenado en los ecosistemas forestales y su equivalente en CO₂ para estimar de forma fiable la contribución de este sumidero de carbono en la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero. El presente estudio pretende, en primer lugar mediante un estudio de campo, evaluar el volumen de madera en pie y estimar la cantidad de carbono contenida en las partes aéreas y radicales, determinando al mismo tiempo el factor de expansión y conversión en biomasa (FECB) específico del cedro del Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) situado en la zona central del Atlas Medio. Los resultados obtenidos se compararon con los provenientes de la utilización de los parámetros genéricos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2006. Los volúmenes de madera en pie y en biomasa aérea se determinaron utilizando tasas de cubicación y modelos de biomasa desarrollados a partir de mediciones directas del peso seco y del volumen de 30 árboles muestreados en cada bosque de la zona de estudio. El volumen y la biomasa aérea se evaluaron en 3 321 284 m³ y 1 179 188 t de materia seca, respectivamente. El FECB, determinado por la relación entre el volumen y la biomasa, es de 0,36 tMS/m³, que es inferior al valor estimado por el IPCC (0,55 tMS/m³). La fracción de carbono (FC), resultante de la calcinación de las muestras de madera recogidas, es del orden de 0,5643 tC/tMS. Es superior al valor dado por el IPCC (0,51 tC/tMS). Finalmente, la cantidad de carbono contenida en el ecosistema estudiado es de 858 387 t de materia seca frente a 1 201 789 t estimadas a partir de los parámetros del IPCC.

Palabras clave: carbono, GES, FECB, biomasa, fracción de carbono, IPCC, cambios globales, Marruecos.

Introduction

Il est devenu évident que l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) émis dans l'atmosphère, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), engendre de sérieux effets néfastes sur l'environnement ainsi que des dérèglements climatiques. Ce phénomène inquiète fortement les communautés scientifiques et civiles, qui reconnaissent que le système climatique est une ressource commune et partagée dont la stabilité peut être affectée. Dans ce sens, les scientifiques ont commencé à mettre en place des instances et des mécanismes, basés sur la connaissance et l'adoption de méthodologies de quantification du phénomène et sur la proposition de mesures d'atténuation et ou d'adaptation, pour y faire face.

Pour une bonne maîtrise de l'impact de ce phénomène des changements climatiques, l'identification des sources et des quantités des GES émis, ainsi que la détermination des puits de carbone qui contribuent à la séquestration de ces derniers dont les forêts, qui en constituent un réservoir clef, semblent indispensables. En effet, toutes les plantes forestières utilisent la photosynthèse pour absorber le CO₂ atmosphérique et le transformer en différents composés organiques qui constituent leur matériel végétal comme le bois, l'écorce ou les feuilles (ILWAC, 2013). Le stockage de carbone, sous forme de biomasse végétale, constitue à cet effet une solution efficace, peu coûteuse et très prometteuse pour la diminution et la régulation du niveau du CO₂ dans l'atmosphère.

En raison de la longue durée de vie de la plupart des arbres forestiers et de leurs dimensions relativement importantes, les forêts sont considérées comme le réservoir terrestre de carbone le plus important. En effet, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et d'autres comités scientifiques (FAO, Cirad) estiment que jusqu'à 25 % de l'absorption du CO₂ atmosphérique se fait au sein des forêts (ILWAC, 2013). Elles séquestrent 9,2 Gt/an d'émissions nettes de CO₂, soit l'équivalent de 33 % des émissions de GES mondiales (GIEC, 2014).

Au Maroc, les ressources forestières qui s'étendent sur une superficie de plus de 9 millions d'hectares, dont environ 6 millions d'hectares sont boisés (Global Forest Resources Assessment, 2020), constituent un support essentiel et incontournable pour la vie humaine. Elles remplissent de multiples fonctions capitales en termes d'atténuation des changements climatiques et d'adaptation à leurs effets en raison de la diversité des écosystèmes. Elles contribuent, selon les données de la Troisième Communication nationale (2016), à l'absorption annuelle de 4 018 Gt de CO₂, soit l'équivalent de 1 096 Gt de C par an en termes de séquestration de carbone (Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 2016). L'estimation de ces données d'absorption de CO₂ s'est basée sur des facteurs génériques et des hypothèses proposées par le GIEC, et ce en l'absence d'études au niveau national pour la production de ces facteurs (GIEC, 2007).

Dans ce sens, et pour la définition de stratégies nationales adaptées et acceptables vis-à-vis des engagements internationaux en matière de marché de carbone, l'adoption et l'utilisation de méthodes fiables pour la connaissance et la quantification nationale du potentiel de volume et de carbone du bois sur pied s'imposent.

Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) est une espèce qui est présente principalement dans les zones montagneuses du Maroc situées entre 1 500 et 2 500 m d'altitude (Emberger, 1939 ; Lepoutre et Pujos, 1964). C'est un arbre d'allure beaucoup plus majestueuse et imposante que les autres espèces (Lepoutre et Pujos, 1964 ; M'Hirit et al., 1994 ; M'Hirit, 1994). Sa hauteur atteint facilement les 40 m, pour une circonférence comprise entre 2 et 3 m. Il s'étend sur plus de 116 000 ha dans le Moyen et le Haut Atlas, et sur 15 000 ha dans le Rif (Inventaire forestier national, 1996). Il couvre un large éventail de climats, s'étendant du subhumide à l'étage montagnard méditerranéen, en passant par le climat humide.

Élément traditionnel de la culture et du paysage marocains, il constitue également une ressource économique importante pour le Maroc, puisqu'il représente 90 % des ressources en bois d'œuvre et fournit environ 90 000 m³ de bois de feu chaque année dans ce pays (El Abid, 1993).



Photo 2.

Peuplement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) de la forêt de Jbel Aoua Sud.

Stand of Atlas Cedar (*Cedrus atlantica*) in the forest of Jbel Aoua Sud.

Photo M. El Mderssa.

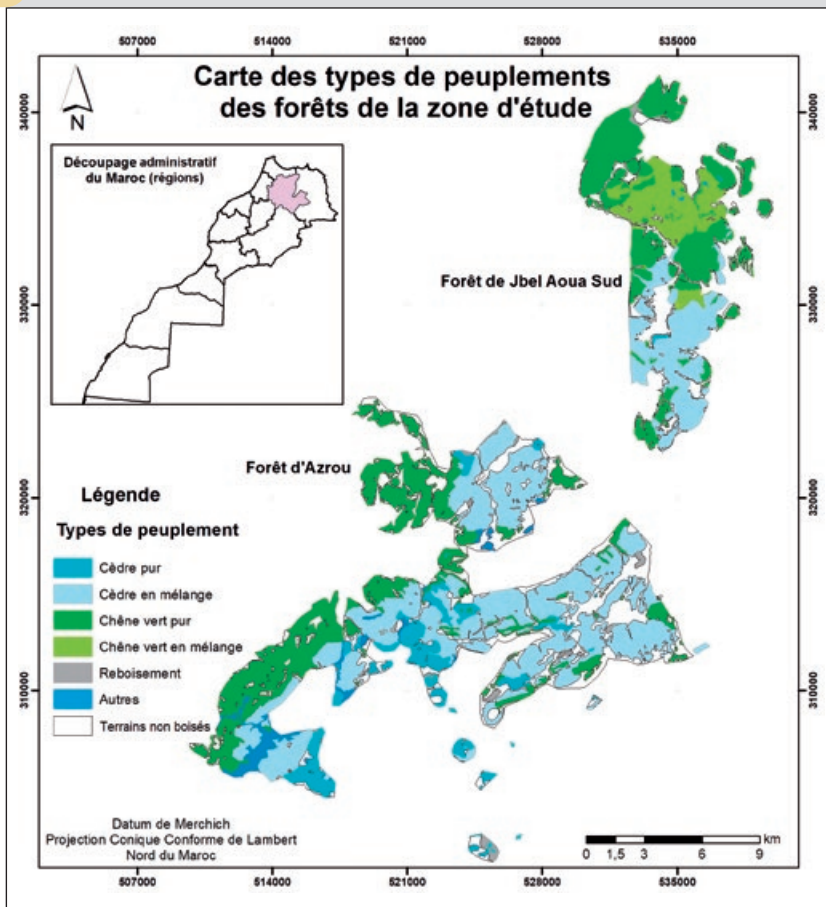


Figure 1.
Carte des types de peuplements dans les forêts d'Azrou et de Jbel Aoua Sud au Maroc.
Map of stand types in the forests of Azrou and Jbel Aoua Sud in Morocco.

De par l'importance de cette ressource à l'échelle locale et régionale, cette étude aborde les différentes étapes mises en œuvre pour la quantification du volume de bois sur pied et de la biomasse aérienne du cèdre de l'Atlas, nécessaires à la détermination du facteur d'expansion et de conversion de la biomasse (FECB) spécifique à cette espèce dans les forêts d'Azrou et de Jbel Aoua Sud du Moyen Atlas central, et par la suite la détermination de la fraction de carbone (FC) contenue dans la biomasse ligneuse aérienne et souterraine, pour enfin en déduire la quantité de carbone stockée. Les valeurs du FECB, de la FC et de la quantité de carbone issues des mesures réalisées sur la zone étudiée sont ensuite comparées à celles provenant des méthodes génériques proposées par le GIEC, permettant par conséquent d'améliorer la qualité et la précision des estimations du potentiel forestier (biomasse, quantité des GES...) à travers l'utilisation de ces valeurs spécifiques et nationales.

Matériels et méthodes

Présentation de la zone d'étude

L'étude s'est portée sur les peuplements de cèdre de l'Atlas composant les forêts du Moyen Atlas central, plus particulièrement les forêts d'Azrou et de Jbel Aoua Sud (figure 1).

La forêt d'Azrou est située sur la bordure nord du plateau du Moyen Atlas et s'étend sur une superficie de 17 806,7 ha. Elle est caractérisée par un relief contrasté avec des altitudes très variables allant de 1 250 m à 2 103 m. Les précipitations sont relativement élevées, atteignant en moyenne 982 mm/an, et se produisent sous forme de pluie ou de neige (Achehboune, 2006 ; Laariby et Belghazi, 2016). Au sein de cette forêt, le coefficient pluviométrique d'Emberger varie entre 101 et 114, définissant ainsi un bioclimat méditerranéen humide à variante froide et subhumide à variante tempérée. Le climat se caractérise aussi par des orages importants, particulièrement en été, rendant plus favorables l'installation et le développement de la cédraie.

Quant à la forêt de Jbel Aoua Sud, elle couvre une superficie de 7 865,4 ha. Sa structure géologique est très compliquée avec de nombreux redoublements des couches du Lias moyen, calcaire et dolomitique. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 537 mm et 1 122 mm, les températures moyennes minimales de $-4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, et celles maximales entre $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $32,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'analyse bioclimatique de cette forêt montre que la période de sécheresse dure 5,5 mois et que l'ambiance bioclimatique est subhumide à variante froide (HCEFLCD, 2007). En ce qui concerne la neige, la zone étudiée enregistre annuellement 20 jours de neige en moyenne et 50 à 100 jours de gelée, à titre indicatif (Alami, 2010).

La composition des formations végétales des deux massifs forestiers est représentée dans le tableau I et la figure 1. Elle comprend des peuplements purs de cèdre, le cèdre en mélange essentiellement avec le chêne vert (*Quercus ilex*), des peuplements purs de chêne vert et des reboisements à base de cèdre, de cyprès de l'Arizona et de peuplier, ainsi que des espaces non boisés (HCEFLCD, 2007).

Approche méthodologique

L'estimation du stock de carbone des arbres de cèdre de la zone étudiée, qu'il soit aérien ou souterrain (racines), nécessite une évaluation de leur volume et leur biomasse disponible. Pour ce faire et dans le but de connaître la structure des peuplements de cèdre et d'étendre l'estimation du stock de carbone des différentes placettes échantillons à l'ensemble des peuplements des deux forêts, un inventaire exhaustif des circonférences à 1,30 m du sol de

Tableau I.
 Composition forestière dans les forêts d'Azrou et de Jbel Aoua Sud.
Forest composition in the forests of Azrou and Jbel Aoua Sud.

Type de peuplement	Forêt d'Azrou		Forêt de Jbel Aoua Sud	
	Superficie (ha)	Pourcentage dans l'ensemble de la forêt (%)	Superficie (ha)	Pourcentage dans l'ensemble de la forêt (%)
Cèdre de l'Atlas pur (<i>Cedrus atlantica</i>)	1 497,4	8,41	16,7	0,21
Chêne vert pur (<i>Quercus ilex</i>)	4 419,8	24,82	3 384,6	43,50
Cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i>) + chêne vert (<i>Quercus ilex</i>)	7 182,0	40,33	2 008,5	26,28
Chêne vert (<i>Quercus rotundifolia</i>) + pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>)			1 509,2	19,24
Cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i>) + chêne vert (<i>Quercus ilex</i>) + pin maritime (<i>Pinus pinaster</i>)			196,2	2,50
Reboisement : cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i>) + cyprès (<i>Cupressus</i> sp.) + peuplier (<i>Populus</i> sp.)	315,1	1,78		
Reboisement			51,0	0,64
Autres : vides asylvatiques + essences secondaires	4 392,4	24,67		
Vides asylvatiques			600,2	7,63
Total	17 806,7	100	7 865,4	100

Source : HCEFLCD, 2007.

tous les arbres à l'intérieur des placettes d'échantillonnage circulaires, d'une superficie de 5 ares chacune dans la zone d'étude, a été réalisé. Le nombre total des placettes est de 56. Ces placettes ont été réparties suivant un échantillonnage stratifié systématique.

La quantification du volume de matière ligneuse sur pied est une opération primordiale et indispensable pour la définition des facteurs de production. L'estimation des volumes a nécessité l'ajustement des modèles mathématiques des tarifs de cubage spécifiques pour le cèdre. Le tarif a été élaboré à partir d'observations comprenant la variable expliquée (volume en m³) et les variables explicatives (circonférence du tronc à 1,30 m en cm et hauteur en m). Situés dans les deux forêts, les arbres abattus dans le cadre des lots d'exploitation régulière des peuplements de cèdre ont été utilisés. Un échantillonnage de 30 arbres par forêt, pondérés par classes de circonférence selon les résultats de l'inventaire réalisé, a été choisi afin d'effectuer les mesures suivantes :

- mesure de la circonférence à 1,30 m du sol de l'arbre sur pied à l'aide d'un compas électronique ;
- mesure des circonférences gros bout et petit bout des billons de 2 m de longueur chacun, à partir de la base de l'arbre jusqu'à la découpe du bois fort (20 cm de circonférence) de l'arbre abattu, à l'aide d'un mètre ruban ;
- mesure de la longueur totale de l'arbre abattu à l'aide d'un mètre ruban.

Le volume des billons successifs des tiges a été estimé par la formule de Smalian :

$$V = [(B^2 + b^2)/2]L \times \pi/4$$

où B est le diamètre de gros bout, b le diamètre de petit bout et L la longueur de billon (2 m).

Le volume total de l'arbre est la somme des volumes des différents billons du même arbre.

De même, et pour déterminer la biomasse individuelle, le même échantillonnage de 30 arbres pondérés par classes de circonférence a été utilisé, pour lequel, en plus des mesures déjà décrites pour l'estimation des volumes, la séparation des différentes parties de chaque arbre échantillon et puis la pesée des paramètres en dessous a été effectuée :

- masse totale des branches (en kg) à l'aide d'une balance à ressort (*pocket balance*) avec une précision d'un kilogramme ;
- masse totale des aiguilles à l'aide d'une balance électronique avec une précision d'un gramme ;
- masse totale du tronc estimée en multipliant le volume de bois par la densité du bois de cèdre.

À la fin de ces pesées, il a été prélevé :

- au niveau du tronc, trois rondelles de 5 cm d'épaisseur, une à la base, une à mi-longueur et une à la découpe 5 cm de diamètre ;
- au niveau de la branche moyenne de chaque arbre, une rondelle de 3 cm d'épaisseur à mi-longueur ;
- au niveau des aiguilles, un échantillon d'environ 100 g de chaque arbre.

Tableau II.

Modèles d'équations testées pour l'estimation du bois et de la biomasse.

Tested equation models for wood and biomass estimation.

Type de tarif	Équations testées
Tarif de cubage bois	$V = b + aC$
	$V = b + aC^2$
	$V = b + aC + dC^2$
	$V = aC^b$
Tarif de cubage biomasse	$PST = a(C^2H)^b$
	$PST = aC^b H^d$

V : volume (m³) ; PST: poids sec total (t) ; C : circonférence de l'arbre à 1,30 cm (m) ; H : hauteur totale de l'arbre (m) ; a, b et d : coefficients de régression à estimer.

Les rondelles et l'échantillon d'aiguilles ont été mis dans des sachets de polyéthylène pour étuvage au laboratoire pendant 24 h aux températures respectives de 105 °C pour le bois et 65 °C pour les aiguilles (Riedacker, 1978 in Belghazi, 2001) afin de déterminer leur poids sec.

Aussi et afin de définir la teneur en carbone organique dans chaque compartiment de l'arbre (fraction carbone), des aliquotes de bois et des aiguilles ont été prélevées à partir de chaque arbre échantillonné. Ces aliquotes ont été mis par la suite dans un four à moufle pour calcination à 600 °C pendant 24 h.

Ainsi, le facteur d'expansion et de conversion de la biomasse (FECB) a été déduit à partir de la formule suivante, dite formule générale de calcul de la biomasse aérienne :

$$BA = V * FECB$$

avec BA la biomasse aérienne en t/ha, V le volume en m³.

En matière d'analyse statistique, les tarifs de cubage du volume et de la biomasse ont été élaborés sous forme de relations de régression mathématique entre deux catégories de variables : une variable dépendante qui est le volume ou la biomasse de l'arbre et une ou plusieurs variables indépendantes qui sont les entrées du tarif, lesquelles sont dans notre cas la circonférence à 1,30 m et la hauteur totale de l'arbre.

Aussi, un modèle carbo-masse permettant l'estimation directe du stock de carbone à partir de la circonférence à 1,30 m du sol et la hauteur totale a été établi et il est largement utilisé dans les études de biomasses forestières (Boulmane *et al.*, 2013 ; Picard *et al.*, 2012 ; McGhee *et al.*, 2016 ; Huaijiang *et al.*, 2018). L'ajustement des modèles par les techniques de la régression linéaire a été opéré à l'aide du logiciel R. Les modèles des équations testées sont retranscrits dans le tableau II. Également, un modèle pour l'estimation des hauteurs des arbres en fonction de la circonférence à 1,30 m a été développé.

Le choix du meilleur modèle pour chacune des variables à expliquer a été fondé sur l'analyse d'un certain nombre de paramètres statistiques, à savoir :

**Photo 3.**

Peuplement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) de la forêt de Jbel Aoua Sud.
*Stand of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the forest of Jbel Aoua Sud.*
Photo M. El Mderssa.

▪ le coefficient de détermination (R²), qui traduit la part de la variation expliquée par le modèle qui doit être élevée ; ce paramètre est calculé comme suit :

$$R^2 = 1 - SRC/SCT$$

avec SCR la somme des carrés des écarts et SCT la somme des carrés totaux ;

▪ le test statistique de Durbin-Watson (D) qui traduit l'indépendance des résidus ; selon la table de Durbin-Watson, une valeur inférieure à 2 indique l'existence d'une corrélation positive entre les résidus successifs, et une valeur supérieure à 2 correspond à une corrélation négative entre ces mêmes aléas ; par contre une valeur voisine de 2 ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'indépendance des résidus (Tranchefort, 1974). La formule de calcul de ce paramètre est la suivante :

$$D = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

avec e la moyenne des écarts ;

▪ le critère d'information d'Akaike (AIC), qui se base sur le principe de la vraisemblance, permet de pénaliser les modèles en fonction du nombre de paramètres afin de satisfaire le critère de parcimonie. Le modèle avec l'AIC le plus faible (Akaike, 1974) est alors choisi. L'AIC se calcule ainsi :

$$AIC = -2 \ln l(\theta) + 2q$$

Tableau III.

Caractéristiques dendrométriques du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans les forêts d'Azrou et de Jbel Aoua Sud.
Dendrometric characteristics of Atlas cedar (Cedrus atlantica) in the Azrou and Jbel Aoua Sud forests.

Superficie totale de la zone d'étude (ha)	Superficie totale du cèdre de l'Atlas (ha)	Pourcentage du cèdre de l'Atlas (%)	Densité moyenne par hectare	Circonférence moyenne par hectare (cm)	Surface terrière moyenne (m ² /ha)
25 672,21	10 900,87	42,46	103	160	25,23

avec $l(\theta)$ la vraisemblance du modèle et q le nombre de paramètres libres estimés ;

▪ l'erreur quadratique moyenne type (RMSE), qui est la racine carrée de la MSE (erreur quadratique moyenne), représentant ainsi la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations, valeur à minimiser dans le cadre d'une régression simple ou multiple. La méthode est fondée sur la nullité de la moyenne des résidus. Le meilleur modèle est celui qui présente une RMSE plus faible. Ce paramètre est calculé à partir de la formule suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln Y_i - \widehat{\ln Y_i})^2}{n}}$$

où Y_i et \widehat{Y}_i sont les valeurs observées et prédites du modèle, n est le nombre d'arbres échantillons.

Résultats

Description dendrométrique des peuplements de cèdre

À l'issue de la réalisation de l'opération d'inventaire forestier des différents peuplements de cèdre au sein des forêts étudiées, les principales caractéristiques dendrométriques obtenues sont présentées dans le tableau III.

Établissement de la relation hauteur-circonférence

Compte tenu du fait que l'opération de mesure des hauteurs des arbres d'un peuplement est onéreuse et n'est pas toujours facile à réaliser sur le terrain, le recours à l'établissement d'une relation liant la hauteur de l'arbre à sa circonférence a été jugé indispensable et efficace. Les caractéristiques du modèle retenu sont présentées dans le tableau IV.

Élaboration du tarif de cubage bois et détermination du volume total

Les caractéristiques du modèle retenu pour l'estimation des volumes sur pied des peuplements de cèdre au sein des deux massifs forestiers et les critères de validation sont présentés dans le tableau V.

L'application pondérée dudit tarif retenu aux résultats de l'inventaire des peuplements de cèdre au sein des deux forêts a permis d'estimer le volume total de cette espèce à 3 321 284 m³, soit une moyenne de l'ordre de 305 m³/ha pour les différentes formations à base de cèdre.

Élaboration du tarif biomasse et détermination de la biomasse totale

La détermination de la biomasse des arbres du cèdre a été opérée par la sommation des biomasses de chacun des compartiments des arbres échantillons, tronc, branches et aiguilles, après laquelle un tarif d'estimation de la biomasse aérienne a été ajusté. Les caractéristiques du modèle d'estimation de la biomasse retenu sont consignées dans le tableau VI.

Tableau IV.

Caractéristiques statistiques du modèle hauteur-circonférence retenu.

Statistical characteristics of the selected height-conference model.

Modèle ajusté	R ²	RMSE	D	AIC
$H = -6,809 + 28,356 C - 6,781 C^2$	80,87	7,595	2,011	138,11

R²: coefficient de détermination ; RMSE : erreur quadratique moyenne type ; D : statistique de Durbin-Watson ; AIC : critère d'information d'Akaike ; C : circonférence de l'arbre à 1,30 cm (m) ; H : hauteur totale de l'arbre (m).

Tableau V.

Caractéristiques statistiques du modèle tarif de cubage-volume.

Statistical characteristics of the cubic volume tariff model.

Modèle retenu	R ²	Erreur	D standard	Intervalle d'application
$V = 0,822 C^{2,241}$	98,9	0,22	2,56	50-500 cm

V : volume (m³) ; R² : coefficient de détermination ; D : statistique de Durbin-Watson ; C : circonférence de l'arbre à 1,30 cm (m).

Tableau VI.

Caractéristiques statistiques du modèle biomasse.
Statistical characteristics of the biomass model.

Modèle ajusté	R ²	RMSE	AIC	CF
$\ln(\text{PST}) = 4,5656 + 2,1437 \ln(\text{C}) + 0,4026 \ln(\text{H})$	98,1	1,814	-12,348	1,017

PST : masse sèche totale de l'arbre (t) ; R² : coefficient de détermination ;
RMSE : erreur quadratique moyenne type ; AIC : critère d'information d'Akaïke ;
CF : facteur de correction ; C : circonférence de l'arbre à 1,30 cm (m) ;
H : hauteur totale de l'arbre (m).

L'application du modèle biomasse ci-dessous mentionnée a permis de quantifier la biomasse aérienne pondérée du cèdre dans la zone d'étude à 1 179 189 t dans la partie aérienne, soit l'équivalent de 108 tMS/ha (tMS = tonne de matière sèche).

Pour la quantification de la matière végétale constituant la partie racinaire, les données génériques du GIEC ont été utilisées. De ce fait, et en se référant au tableau 4.4 du GIEC qui présente le taux de la biomasse souterraine par rapport à la biomasse aérienne et en se basant sur le volume aérien moyen dans la zone étudiée, le taux retenu

(Tx) est de 0,29 % par rapport au volume de la partie aérienne. Le Tx retenu dans notre cas est celui proposé pour les forêts tempérées qui sont supposées les plus proches des forêts méditerranéennes, et ce en l'absence de valeurs propres à ces dernières.

De ce fait, en se référant au taux susmentionné, la biomasse totale aérienne et souterraine pondérée du cèdre dans la zone étudiée est estimée à 1 521 153 t de matière sèche, équivalant à 140 tMS/ha.

Détermination et comparaison du FECB pour le cèdre de l'Atlas avec celui du GIEC (2006)

La valeur du FECB pour le cèdre au sein de la zone étudiée est de 0,36 tMS/m³. Quant à la valeur du FECB proposée par le GIEC en 2006 (pour la zone climatique forêts méditerranéenne, tropicale sèche, subtropicale), elle est de 0,55 tMS/m³. Ces différents résultats sont consignés dans le tableau VII.

Tableau VII.

Valeurs des biomasses et des facteurs d'expansion et de conversion de la biomasse (FECB) du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans les forêts d'Azrou et Jbel Aoua Sud et du GIEC (2006).
Biomass values and Biomass Expansion and Conversion Factors (BECF) of Atlas cedar (Cedrus atlantica) in Azrou and Jbel Aoua South forests and IPCC (2006).

Espèce	Volume total des peuplements de cèdre de l'Atlas (m ³)	Biomasse totale mesurée des peuplements de cèdre de l'Atlas (t MS)	Biomasse totale des peuplements de cèdre selon le GIEC (2006) (t MS)	FECB du cèdre de l'Atlas (t)	FECB du GIEC (2006)*
Cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i>)	3 321 284	1 179 188	1 826 706	0,36	0,55

* Valeur GIEC 2006 pour la zone climatique forêts méditerranéenne, tropicale sèche, subtropicale issue du tableau 4.5.

Tableau VIII.

Comparaison de la quantité de carbone contenue dans le matériel végétal du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) dans les forêts d'Azrou et de Jbel Aoua Sud et leur équivalent en CO₂.
Comparison of the amount of carbon contained in the plant material of the Atlas cedar (Cedrus atlantica) in the forests of Azrou and Jbel Aoua Sud and their CO₂ equivalent.

Biomasse totale mesurée (tMS)	Fraction de carbone mesurée (tC/tMS)	Quantité de carbone (t)	Quantité de CO ₂ (t)	Biomasse totale selon les données du GIEC (2006) (tMS)	Fraction de carbone selon le GIEC (2006)	Quantité de carbone selon le GIEC (2006) (t)	Quantité de CO ₂ selon le GIEC (2006) (t)
1 521 153	0,5643	858 387	- 3 147 705	2 356 450	0,51	1 201 789	- 4 406 960



a c
b

Photos 4.

Prises de mesures : a. Mesure du poids frais d'une rondelle de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) pour déterminer la biomasse ; b. Mesure du diamètre d'un arbre de cèdre de l'Atlas ; c. Travaux d'inventaire forestier dans le peuplement du cèdre de l'Atlas.
 Measurements: a. Measurement of the fresh weight of an Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) log to determine the biomass; b. Measurement of the diameter of an Atlas cedar tree; c. Forest inventory work in the Atlas cedar stand.
 Photos M. El Mderssa.

Détermination et comparaison de la fraction de carbone (FC) du cèdre avec celle du GIEC (2006)

Le résultat d'estimation de la FC contenue dans les arbres de cèdre dans la zone étudiée est évalué à 0,5643 tC/tMS.

La valeur de la FC proposée dans le tableau 4.3 du rapport du GIEC (2006) pour les forêts tempérées et boréales est de 0,51 tC/tMS. Le recours à la FC proposée pour ces forêts a été fait en l'absence de valeurs propres aux forêts méditerranéennes.

Comparaison de la quantité de carbone pour le cèdre dans des forêts étudiées par les mesures directes et les facteurs du GIEC (2006)

La quantification du carbone contenu dans les peuplements de cèdre, basée sur la biomasse totale estimée et la base de la FC mesurée, a été évaluée à 858 387 t (C). Quant à l'estimation de la quantité de carbone de ces mêmes peuplements basée sur les données génériques du GIEC de 2006, elle a été quantifiée à 1 201 789 t (C).

Aussi une conversion de la quantité de carbone en quantité de dioxyde de carbone a-t-elle été opérée à travers la multiplication de la première par 3,667 (le rapport des masses moléculaires de CO₂/C qui correspond au rapport 44/12 ou 3,67) (GIEC, 2006 ; McGhee et al., 2016).

Les résultats de cette comparaison apparaissent dans le tableau VIII.

Discussion

L'atténuation des effets du changement climatique est, aujourd'hui, l'une des stratégies envisagées pour faire face au réchauffement global. Cette stratégie vise à atténuer les émissions de gaz à effet de serre en tentant d'en réduire les sources et d'en consolider les puits (Nadhem, 2011).

Du fait du potentiel de séquestration important de carbone dans les forêts et de la richesse quantitative et qualitative des écosystèmes forestiers au Maroc, la maîtrise du capital sur pied et le développement de facteurs nationaux tenant compte des spécificités locales semblent nécessaires pour une estimation fiable de la quantité de carbone qui y est emmagasinée.

Le matériel végétal aérien et souterrain du cèdre de l'Atlas contenu dans la zone d'étude a été ainsi estimé à un volume de l'ordre de 3 321 284 m³, l'équivalent d'une moyenne de l'ordre de 305 m³/ha. Cette moyenne est considérée comme l'une des plus élevées au niveau national où, par exemple, pour les formations naturelles elle est seulement de 28 m³/ha pour le chêne vert, 63 m³/ha pour le chêne-liège et 34 m³/ha pour le thuya au sein de la forêt de Zltchouine (HCEFLCDA, 2014) et de 20,4 m³/ha et 23,8 m³/ha respectivement pour les reboisements d'eucalyptus et de pin au sein de la forêt de la Maâmora (HCEFLCDB, 2014). Ce grand potentiel de production du cèdre tient au fait de la longévité élevée et des caractéristiques dendrométriques de cette espèce et des conditions de son développement.

Aussi, les travaux de terrain ainsi que les analyses en laboratoire d'un échantillon représentatif des peuplements étudiés ont permis de déterminer, avec une grande précision (R² = 98,1 %), la biomasse totale de cette espèce. Elle a été évaluée à 1 521 153 t de matière sèche, soit une moyenne de 140 tMS/ha. Cette moyenne est également comptée parmi les plus élevées au niveau national, pour les mêmes raisons que celles citées pour le volume. Elle est estimée à 89,5 tMS/ha pour la subéraie occidentale de la Maâmora (Oubrahim, 2015).

Pour ce qui est de la valeur du FECB adoptée, elle a été estimée à 0,36 tMS/m³. En l'absence de valeurs spécifiques au niveau national et comparée à la valeur générique du GIEC en 2006, jusqu'ici utilisée pour la quantification du carbone dans le Maroc, qui est de 0,55 tMS/m³, on constate une différence significative entre cette valeur générique du GIEC (2006), retenue pour toute la zone climatique des forêts méditerranéenne, tropicale sèche, subtropicale, et celle spécifique au cèdre du Moyen Atlas (MA). Le rapport entre les deux valeurs des FECB (FECB cèdre-MA/FECB-GIEC) est de 65 %. Ceci peut être expliqué par l'âge moyen élevé des peuplements étudiés qui est de 105 ans et où le FECB a tendance à décroître en fonction de l'âge du peuplement car la densité du stock en croissance augmente (GIEC, 2006).

Quant à la FC, la valeur mesurée dans la zone étudiée est de 0,5643 tC/tMS. Elle est supérieure à celle générique proposée dans les tableaux du GIEC en 2006, qui est de 0,51 tC/tMS.

Pour ce qui est de la quantité de carbone emmagasinée dans la partie aérienne et racinaire de cette cédraie de la zone étudiée, elle est de 858 387 t de carbone (– 3 147 705 t de CO₂) contre 1 201 789 t de carbone (– 4 406 960 t de CO₂) estimées avec les paramètres du GIEC. Cela témoigne d'une légère sous-estimation en matière de séquestration de carbone comparativement aux données génériques.

La moyenne ainsi retenue est de 78,75 tC/ha, qui est parmi les plus élevées au niveau national, confirmant le constat de Le Clec'h *et al.* (2013) qui concluent que les stocks de carbone les plus élevés se situent dans les zones les plus boisées (forêts denses). En effet, le stock de carbone dans les peuplements de chêne-liège de la Maâmora occidentale varie entre 40,84 tC/ha et 77,70 tC/ha (Oubrahim *et al.*, 2015) et celui du chêne vert du Moyen Atlas est évalué à 58 tC/ha dans la forêt de Reggada et 64 tC/ha dans la forêt de Tafchna (Boulmane *et al.*, 2010).

En comparant nos valeurs à celles d'autres écosystèmes méditerranéens, et plus particulièrement en France, les peuplements à plus fort stock par unité de surface sont les sapinières (87 tC/ha) et les hêtraies (84 tC/ha), les plus faibles étant les peuplements de Douglas (45 tC/ha), en raison de leur jeune âge (Institut de France, 2010).

Conclusion

En raison de leur grande étendue sur plus de 9 millions d'hectares et de leur diversité remarquable, les forêts marocaines fournissent de nombreux produits et services écosystémiques et participent de manière considérable à la régulation du climat et l'emmagasinement du carbone.

La présente étude s'inscrit dans le cadre de l'estimation des paramètres dendrométriques, de la biomasse aérienne et souterraine, du facteur d'expansion et de conversion de la biomasse (FECB) et de la fraction de carbone (FC) contenue dans l'écosystème du cèdre de l'Atlas dans le Moyen Atlas marocain. Elle vise aussi à comparer les valeurs obtenues à celles génériques du GIEC utilisées à l'heure actuelle pour les estimations de carbone au niveau national marocain.

Les résultats obtenus montrent que la biomasse aérienne pondérée du cèdre de l'Atlas dans la zone d'étude s'élève à 108 tMS/ha pour la partie aérienne, et le matériel végétal aérien et souterrain à 305 m³/ha. Ces deux valeurs sont considérées parmi les plus élevées par rapport aux autres espèces marocaines.

La valeur du FECB obtenue est de 0,36 tMS/m³. Elle est inférieure à celle générique proposée dans les tableaux du GIEC en 2006, qui est de 0,55 tMS/m³; le rapport des deux valeurs est de 65 %.

Quant à la fraction de carbone, la valeur mesurée dans la cédraie des forêts étudiées est de 0,5643 tC/tMS. Elle est supérieure à celle générique proposée dans les tableaux du GIEC (2006), qui est de 0,51 tC/tMS.

La résultante en matière de carbone emmagasiné est de 798 499 t dans les parties aériennes et souterraines contre 1 201 789 t estimées par le GIEC en 2006.

De ce fait, au vu des différences constatées par rapport aux données génériques du GIEC en 2006, les différents

résultats susmentionnés seront sans doute d'une grande utilité pour une évaluation plus précise et plus fiable du matériel végétal des peuplements de cèdre au niveau national ainsi que de leur potentiel de séquestration de carbone. Ils devront être complétés pour les autres espèces marocaines, cela permettant de disposer de valeurs nationales pour ces différents paramètres.

Financement

Les auteurs n'ont bénéficié d'aucune source de financement, ni bénéficié du cadre d'un projet.

Accès aux données

Les données utilisées et collectées sont disponibles auprès de l'auteur correspondant.

Références

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 : Jbel Aoua sud et Ait Youssi d'Amekla). Mémoire de 3^e cycle, ENFI, Salé, Maroc, 78 p. + annexes.

Akaïke H., 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, 19: 716-723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>

Alami M., 2010. Étude dendrométrique et sylvicole des travaux de dépressages du chêne vert (*Quercus rotundifolia* Lamk.) au niveau des forêts du Moyen Atlas central (cas de la province d'Ifrane). Mémoire de 3^e cycle, ENFI, Salé, Maroc, 97 p.

Belghazi B., 2001. Estimation de la biomasse du chêne vert dans le massif forestier d'Ait Hatem (Oulmes). Annales de la Recherche Forestière au Maroc, 34 (1) : 19-16. <https://search.emarefa.net/detail/BIM-393138>

Boulmane M., Makhloufi M., Bouillet J.-P., Saint-André L., Satrani B., Halim M., *et al.*, 2010. Estimation du stock de carbone organique dans la chênaie verte du Moyen Atlas marocain. Acta Botanica Gallica, 157: 451-467. <https://doi.org/10.1080/12538078.2010.10516222>

Boulmane M., Halim M., Khia A., Oubrahim H., Abbassi H., Amrani A., 2013. Biomasse, minéralomasse et éléments nutritifs retournant au sol dans le *Quercus ilex* du Moyen Atlas central marocain. Nature et Technologie, 5 (2), 41-53. <http://193.194.91.150:8080/en/article/43134>

El Abid A., 1993. Bilan des recherches au Maroc en matière d'exploitation et valorisation du cèdre. Annales de la Recherche Forestière au Maroc, 27 : 628-637.

Emberger L., 1939. Aperçu général sur la végétation du Maroc : commentaire de la carte phytogéographique du Maroc 1:1500.000. Mémoire hors-série de la Société des sciences naturelles du Maroc. Berne, Suisse, Hans Huber, 40-157.

GIEC, 2006. Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Chapitre 4 : Terres forestières. GIEC, 93 p. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/vol4.html>

GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique. GIEC, 64 p. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-fr.pdf>

GIEC, 2014. Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, OMM, PNUE, 180 p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf

Global Forest Resources Assessment, 2020. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 – Rapport Maroc. Rome, Italie, FAO, 80 p. <http://www.fao.org/3/cb0140fr/cb0140fr.pdf>

HCEFLCD, 2014a. Procès-verbal de la forêt de Zitchoouine. Étude d'aménagement de la forêt de Zitchoouine. Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Maroc.
HCEFLCD, 2014b. Procès-verbal de la forêt de la Maâmora. État actuel et résultats d'inventaire. Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Maroc.

HCEFLCD, 2007. Projet d'aménagement et de protection des massifs forestiers de la Province d'Ifrane. Plan d'aménagement et de gestion du Parc national d'Ifrane. Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, BRL Ingénierie, 66 p.

Huajiang H., Chunyu Z., Xiuhai Z., Folega F. Jinsong W., Haijun D., et al., 2018. Allometric biomass equations for 12 tree species in coniferous and broadleaved mixed forests, northeastern China. PLOS One, 13 (1): e0186226. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186226>

ILWAC, 2013. Guide méthodologique : Estimation du potentiel de séquestration du carbone au Mali. Observatoire du Sahara et du Sahel, 20 p. http://www.oss-online.org/sites/default/files/2_guide_sequstration.pdf

Institut de France, 2010. Le changement climatique. Institut de France, Académie des sciences, 21 p. <https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rapport261010.pdf>

Inventaire forestier national, 1996. Synthèse de l'inventaire forestier national marocain. Rabat, Maroc, Direction du développement forestier.

Laariba S., Belghazi B., 2016. Dynamique et accroissement radial du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) : Cas de la forêt d'Azrou (Maroc). Nature et Technologie, 8 (1) : 19-32. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/40653>

Le Clec'h S., Oszward J., Jégou N., Dufour S., Cornillon P. A., de Souza Miranda I., et al., 2013. Cartographier le carbone stocké dans la végétation : perspectives pour la spatialisation d'un service écosystémique. Bois et Forêts des Tropiques. 316 : 35-48. <https://doi.org/10.19182/bft2013.316.a20529>

Lepoutre B., Pujos A., 1964. Facteurs climatiques déterminant les conditions de germination des plantules de cèdre. Annales de la Recherche Forestière au Maroc, 7 : 23-54. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/11062.pdf

McGhee W., Saigle W., Padonou E., Lykke A. M., 2016. Méthodes de calcul de la biomasse et du carbone des arbres en Afrique de l'Ouest. Annales des Sciences Agronomiques, spécial Projet Undesert-UE, 20 : 59-66.

M'Hirit O., Samih A., Malagnoux M. (éds), 1994. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Présentation générale et état des connaissances. Réseau Silva Mediterranea. Annales de la Recherche forestière au Maroc, 45 p. <http://www.fao.org/3/AH002F/AH002F00.pdf>

M'Hirit O., 1994. Croissance et productivité du cèdre : Approche multidimensionnelle de l'étude des liaisons stations productions. Annales de la Recherche Forestière au Maroc. 27 : 295-312.

Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, 2016. Rapport de la Troisième Communication nationale du Maroc à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Royaume du Maroc, 296 p. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/marnc3.pdf>

Nadhem B., 2011. Réchauffement climatique et vulnérabilité des sols méditerranéens : spatialisation et séquestration du carbone en Tunisie. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, Tunisie, 300 p.

Oubrahim H., Boulmane M., Bakker M. R., Augusto L., Halim M., 2015. Carbon storage in degraded cork oak (*Quercus suber*) forests on flat lowlands in Morocco. iForest – Biogeosciences and Forestry, 9 (1): 125-137. <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor1364-008>

Picard N., Saint-André L., Henry M., 2012. Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres : de la mesure de terrain à la prédiction. FAO, Cirad, 210 p. <http://www.fao.org/3/i3058f/i3058f.pdf>

Tranchefort J., 1974. La régression : application à l'agronomie. Paris, France, Institut technique des céréales et des fourrages (ITCF), 178 p.

El Mderssa et al. – Author's contributions

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	M. El Mderssa, F. Malki
Gestion des données	M. El Mderssa, F. Malki
Analyse formelle	M. El Mderssa
Enquête et investigation	M. El Mderssa, F. Malki
Méthodologie	M. El Mderssa, F. Malki
Gestion de projet	M. El Mderssa, F. Malki, H. Ikraoun, J. Ibijbjen, L. Nassiri
Ressources	J. Ibijbjen, M. El Mderssa
Supervision	J. Ibijbjen, L. Nassiri
Validation	J. Ibijbjen, L. Nassiri
Visualisation	M. El Mderssa, F. Malki, H. Ikraoun
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	M. El Mderssa, F. Malki, J. Ibijbjen
Écriture – Révision et édition	M. El Mderssa, F. Malki, J. Ibijbjen

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,
34398 Montpellier Cedex 5, France
Contact : bft@cirad.fr - ISSN : L-0006-579X