

Éstimation du stock de carbone organique dans l'écosystème des iliaies du Moyen Atlas marocain

Mohamed BOULMANE^a, Ignacio SANTA-REGINA^b, Abderrahim KHIA^c, Hayat OUBRAHIM^d

^a : Centre de Recherche Forestière, B.P. 763, Av. Omar Ibn Khattab, Agdal-Rabat, Maroc

^b : Institut des Ressources Naturelle et Agrobiologique de Salamanca, IRNASA-CSIC. Apdo. 257, 37008 Salamanca, Espagne

^c : Faculté des Sciences Ibn Tofail, Kénitra,

^d : Faculté des Sciences Mohamed V, Agdal-Rabat, Maroc

Résumé

La présente étude a été réalisée dans l'écosystème de la chênaie verte du Moyen Atlas marocain, dont l'objectif consiste à déterminer le stock de carbone organique dans les différents compartiments (sols, litière et biomasse). Les meilleures corrélations ont été obtenues avec des régressions allométriques pour les différentes composantes épigées des iliaies. La carbomasse totale de la partie aérienne des peuplements (chêne vert et cèdre (*Cedrus atlantica*)) varie entre 50 et 155 tC.ha⁻¹ respectivement pour Reggada et Ajdir ; dont plus de 40 % du carbone est séquestrée dans la cèdraie pour Dayat Hachlaf et Ajdir. Par contre, le stock de carbone des sols (SCOS) varie de 52 tC.ha⁻¹ pour Reggada à 141 tC.ha⁻¹ pour Ajdir. Plus de 75 % du SCOS est emmagasiné dans les 30 premiers centimètres du sol. L'approche corrélatrice montre que les SCOS sont fortement dépendants de la profondeur du sol pour les différents sites étudiés. Les SCOS diminuent avec la profondeur en suivant une courbe exponentielle pour toutes les parcelles. Le stock de carbone organique dans la litière au sol (SCL) varie de 3,5 tC.ha⁻¹ pour Reggada à 14,3 tC.ha⁻¹ pour Ajdir. Le stock du carbone organique total des sols (SCOS + SCL) représente entre 40 et 55 % du stock de carbone organique total des écosystèmes d'iliaies du Moyen Atlas. Le stock de carbone organique total (sol, litière et biomasse) dans les écosystèmes étudiés varie entre 106 tC.ha⁻¹ pour Reggada et 310 tC.ha⁻¹ pour Ajdir. Ce stock augmente linéairement avec la surface terrière totale des peuplements.

Mots clés : Carbomasse, litière, chêne vert, carbone et stock.

Absract :

This study was conducted in *Quercus ilex* Moroccan ecosystem of Middle Atlas, whose objective consists the determination of organic carbon stock in the different compartments (soil, litter and biomass). The best correlations were obtained by allometric regressions for each fraction of the tree biomass between all stands. The total carbomass of aboveground stands (*Quercus ilex* and cedar (*Cedrus atlantica*)) varies between 50 and 155 tC.ha⁻¹ respectively for Reggada and Ajdir ; more than 40 % of carbon is sequestered in the cedar forest to Dayat Hachlaf and Ajdir. Par contre, the soil organic carbon stock (SOCS) varies from 52 tC.ha⁻¹ for Reggada to 141 tC.ha⁻¹ for Ajdir. More than 75 % of SOCS is stored in the first 30 centimeters of soil. The correlative approach shows that SOCS are strongly dependent on the soil depth in the different forest stands. They decreased following an exponential curve in all stands. The litter organic carbon stock (LCS) varies from 3.5 tC.ha⁻¹ for Reggada to 14.3 tC.ha⁻¹ for Ajdir. The stock of total organic carbon soil (SOCS + LCS) is between 40 and 55 % of the total organic carbon stock in the *Quercus ilex* ecosystems of Middle Atlas. The stock of total organic carbon (soil, litter and biomass) in the forest ecosystems studied varied among 106 tC.ha⁻¹ in Reggada to 310 tC.ha⁻¹ in Ajdir. This stock increase linearly with the total basal area of the stands.

Key words : Carbon storage, litterfall, *Quercus ilex*, carbon and stock

1. Introduction

La convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CNUCC) identifie que le système climatique globale est une ressource partagée dont la stabilité peut être affectée par les secteurs industriels et agricoles qui émettent des Gaz à Effet de Serre (GES) et notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote et le méthane.

Situé entre l'océan atlantique à l'ouest et la méditerranée au nord, entre le désert du sahara au sud et l'Europe au nord, le Maroc est une terre de transition et de contrastes [1]. Les émissions nettes annuelles de GES au Maroc en 2000 sont de l'ordre de 64 MtCO₂éq.an⁻¹ [1]. Le CO₂ vient au premier rang avec 42 MtCO₂éq.an⁻¹ et devance largement les autres GES (CH₄ : 433 Kt.an⁻¹ et NO₂ : 55 Kt.an⁻¹) [2]. Selon la seconde communication nationale à CCNUCC (SCN) [1], la forêt marocaine est une source d'émission de GES (6 %). En effet, son émission nette dans l'atmosphère en 2000 est de l'ordre 3,6 MtCO₂éq.an⁻¹. La projection des émissions des GES au Maroc montre que la quantité de GES variera de 65 en 2000 à 111 MtCO₂éq.an⁻¹ en 2020.

Malgré que le Maroc soit un très faible émetteur de GES (2,5 téq/habitant/an), la vie de sa population est très liée au climat et ses fluctuations. En effet, l'économie est très dépendante de l'eau, de l'agriculture, du tourisme et du littoral. L'étude partielle de vulnérabilité aux impacts des changements climatiques, selon seconde communication nationale (2010) [2], présente des projections pour 2020 de quelques variables qualitatives déterminantes pour les contextes environnementales (eau, agriculture) et socio-économiques. En plus, de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des orages frontaux et des sécheresses, dérèglement des précipitations saisonnières et réduction de la durée d'enneigement, les projections climatiques montrent une augmentation de la température moyenne de 0,6 à 1,1 °C et une réduction moyenne du volume annuel des précipitations de l'ordre de 4 %, par rapport à l'année 2000. Ces changements climatiques auront pour conséquence une baisse moyenne et générale des ressources en eau (de l'ordre de 10 à 15 %).

Les écosystèmes forestiers marocains, malgré leur diversité, sont très fragiles, en raison d'une pression accrue due à la poussée démographique et au faible niveau de vie des populations rurales [3]. La collecte du bois de feu est le premier facteur

responsable du recul de la forêt, évalué à l'équivalent de 31 000 ha/an. La biomasse est en effet la principale source d'énergie dans une grande partie des zones rurales [1]. C'est ce qui justifie le but assigné à ce travail à savoir la détermination du stock du carbone dans les sols forestiers et dans la biomasse.

Le chêne vert est l'une des essences les plus répandues dans la partie occidentale du bassin méditerranéen. Il occupe une place très importante vu ces valeurs à la fois écologique, économique et sociale. Il joue pour les populations usagères plusieurs rôles tels que l'alimentation du cheptel en période de disette alimentaire, fourniture du bois de service et du bois pour les besoins énergétiques. Il est spontané dans le bassin méditerranéen et il est particulièrement abondant en Afrique du Nord (2 167 000 ha) [4] ; dont 1 394 000 ha au Maroc [5] soit 29 % de la superficie forestière totale ligneuse, 690 000 ha en Algérie et 83 000 ha en Tunisie.

Au Maroc, le chêne vert se trouve dans le Moyen Atlas (648 000 ha), le Haut Atlas (409 000 ha), l'Atlas Saharien (90 000 ha), la Région Atlantique (88 000 ha), le Sous (75 000 ha) et le Rif (54 000 ha).

Selon la CCNUCC les gouvernements doivent communiquer un inventaire national des émissions d'origine anthropique selon des ressources et des puits de tous les GES. Pour cela, le GIEC a édité des directives pour estimer et rapporter ces inventaires de GES [6, 7]. Cependant, il est souvent difficile de quantifier les sources et les puits de GES dus aux changements d'utilisation de terres et de la foresterie.

D'après nos investigations, excepte les travaux réalisés par Boulmane et *al.*, (2007 ; 2010) [8, 9] et Ouagga (2005) [10], aucun autre travail n'a jusqu'alors ciblé la quantification du stock de carbone total dans les écosystèmes forestiers marocains.

Les objectifs de cette étude consistent à :

- Évaluer le stock de carbone organique emmagasiné dans les écosystèmes de chêne vert du Moyen Atlas (biomasse, litière et sol) ;
- Quantifier leur contribution au bilan national d'émission de GES ;
- Déterminer des modèles allométriques d'estimation du carbone.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques des sites d'études

Pour l'estimation du stock de carbone organique séquestré dans les différentes composantes (sols, litière et biomasse) de l'écosystème du chêne vert au Moyen Atlas (Maroc), cinq parcelles situées dans les forêts de Dayat Hachlaf, Ajdir, Ksiba, Tafachna et Reggada ont été choisies. Dans chaque

parcelle, nous avons choisies quatre placettes représentatives d'un quart hectare chacune. Ainsi, une clairière a été choisie dans chaque forêt. Pour les deux forêts dont l'altitude dépasse 1700 m (Dayat Hachlaf et Ajdir), on a noté la présence de quelques pieds de cèdre avec des surfaces terrières supérieures à celles du chêne vert (Tableau 1). Dans ce tableau, nous avons regroupés les principales caractéristiques des parcelles qui ont fait l'objet de cette étude.

Tableau 1.

Certaines caractéristiques des parcelles d'études.

	Dayat Hachlaf	Ajdir	Ksiba	Tafachna	Reggada
D.P. _{CV} (pieds.ha ⁻¹)	2826	2016	1560	5192	1584
S.T. _{CV} (m ²)	21,7	31,2	32,8	29,8	19,3
C1,30 _{moy. CV} (m)	28,6	37,7	48,3	25,3	37,1
D. P. _{Autres} (pieds.ha ⁻¹)	208 (176 : Cèd., 16 : Ox. et 16 : Le.)	108 (68 : Cèd., 16 : Ox. et 24 : C. Z.)	-	13 Ox.	-
S.T. _{Autres} (m ²)	22,8 (22 : Cèd., 0,4 : Ox. et 0,4 : Le.)	45,23 (41,2 : Cèd., 0,03 : Ox. et 4 : C.Z.)	-	0,04	-
D. P. _{totale} (pieds.ha ⁻¹)	3104	2124	1560	5205	1584
S. T. _{totale} (m ²)	44,5	76,4	32,8	29,8	19,3
Altitude (m)	1820	1730	1450	1670	1450
Pluviométrie (mm.an ⁻¹)	1090	890	780	1090	850
Province	Ifrane	Khénifra	Beni mellal	Khénifra	Ifrane

Avec : moy. = moyenne ; D.P. : Densité de peuplement ; CV : Chêne vert ; C.Z. : Chêne Zeen ; Le. : Leaf ; Ox. : Oxy-cèdre ; Cèd. : Cèdre ; S.T. : Surface Terrière et D.P._{CV} : Densité du peuplement de chêne vert

Les sols des parcelles étudiées sont soit calcaire ou dolomitique avec un pH faiblement à moyennement basique ($7,8 < \text{pH} < 8,5$). La teneur en carbonates de la fraction fine (< 2 mm) est déterminée par calcimétrie et l'analyse granulométrique est effectuée par densimétrie (pipette de Robinson). Ces analyses montrent que toutes les parcelles sont très riches en limon (% limon ≥ 45) et en carbonates (% carbonates entre 13 et 28).

2.2. Prélèvements et analyses des échantillons

Pour le sol

Les échantillons des sols ont été prélevés à partir de cinq couches, choisies aléatoirement (0-15, 15-30, 30-50, 50-70 et 70-100 cm). Comme les sols sont rocheux, on s'est limité à cinq profils de prélèvements pour chaque placette (quatre aux sommets et un au milieu de la placette). Après séchage à 65 °C jusqu'à poids constant, broyage et tamisage à 2 mm des échantillons de sols, nous avons déterminé la teneur en carbone organique

dans la terre fine (< 2 mm) de chaque couche par la méthode Walkley-Black [11].

Pour la biomasse aérienne

Chêne vert

Les opérations effectuées sont les suivantes :

- Inventaire exhaustif sur les quatre placettes consistant à mesurer les circonférences à 1,30 m de tous les arbres ; ce qui permet d'étudier la structure diamétrique des peuplements et de définir les échantillons d'arbres à abattre et par suite d'étendre l'estimation du stock de carbone à l'ensemble du peuplement.

- Détermination de la quantité de carbone présente dans les différentes composantes de l'arbre (tronc, branches, rameaux et feuilles) par une méthode directe consistant à abattre un échantillon de 20 arbres choisis, pour chaque parcelle, dans différentes classes de surface terrière (8-72, 72-199, 199-390, 390-645 cm²). Le tronc, les branches, les rameaux et les feuilles ont été séparés et pesés sur place.

- Tronc : une fois l'arbre abattu, des rondelles de 2 cm d'épaisseur espacées d'un mètre

ont été prélevées. Au laboratoire, les rondelles sont pesées et séchées pour déterminer leurs taux d'humidité.

- Branches : pour chaque arbre abattu, trois branches par niveau (bas, milieu et haut du houppier) ont été sélectionnées. Pour chaque branche, nous avons découpé trois rondelles de 2 cm d'épaisseur (bas, milieu et haut de la branche) ont été découpées.

- Rameaux et feuilles : les rameaux et les feuilles de chaque branche ont été prélevés du bas, milieu et du haut (10 g pour chaque arbre). L'ensemble est bien mélangé, puis deux poignées de chaque compartiment ont été placés dans un sac en plastique et amené au laboratoire pour analyse et détermination du taux d'humidité.

Peuplements associés : Cedrus atlantica (Cèdre de l'Atlas)

Pour le peuplement de cèdre présent dans les forêts de Dayat Hachlaf d'Ajdir, on a appliqué la formule ci-dessous pour l'évaluation du stock de carbone dans la biomasse :

$$SC_{\text{biomasse}} (tC.ha^{-1}) = [(Volume\ total\ (m^3.ha^{-1}) \times Densité\ anhydre\ du\ bois\ (t.MS\ m^{-3})) \times Carbone/Matière\ sèche\ (kg.kg^{-1})]$$

Avec, SC : Stock de carbone et MS : matière sèche.

Connaissant les circonférences à 1,30 m de tous les arbres du cèdre, on a déterminé les tarifs de cubage totaux en appliquant la formule suivante :

$$\ln(V) = 1,9689 + 2,0055\ln(C_{1,30}) + 0,6411\ln(C_{1,30}) \quad [12], \text{ pour la cédraie du Moyen Atlas}$$

Avec : V : Volume en m³ ; C_{1,30} : Circonférence à 1,30 m en m et ln : Logarithme népérien.

Et connaissant aussi, la densité anhydre du cèdre (0,5 t.m⁻³), la teneur en carbone dans la matière sèche (0,5 %) [7] et les circonférences de tous les arbres inventoriés, on a déterminé le stock de carbone dans le peuplement de cèdre

Pour la litière

Pour l'estimation du stock de carbone dans la litière une vingtaine de quadrats carré de 1 m² chacun, espacés de 10 m les uns des autres, ont été installés aléatoirement à l'intérieur de chaque parcelle selon des transects. La litière de chaque quadrat a été récoltée puis pesée et acheminée au laboratoire pour analyse du taux de carbone.

Détermination de la teneur en carbone dans la végétation (biomasse et litière)

Pour la détermination du taux d'humidité, les échantillons sont repesés, séchés à 65 °C jusqu'au poids constant puis repesés. Une fois séchée, la teneur en carbone est analysée par calcination dans un four à moufle à 600 °C pendant 4 heures [13].

2.3. Analyse statistique

La méthode communément utilisée pour l'estimation du stock de carbone dans la partie épigée est basée sur des équations de régression. Cette méthode utilise le plus souvent la circonférence à 1,30 m comme variable explicative [14, 15].

Pour l'estimation du stock de carbone répartie dans les différentes composantes de l'arbre, les ajustements des modèles ont été effectués à l'aide du logiciel SAS (Proc reg, proc nlin, proc model). Le jeu complet d'équations (pour les différents compartiments) est obtenu en suivant la méthode décrite par Saint-André & Picard [16]. Les modèles éprouvés sont de types linéaires ou non linéaires en C_{1,30} (circonférence à 1,30) avec ou sans intercept (avec C_{1,30} : circonférence à 1,30 m).

2.4. Calcul du stock de carbone dans le sol

Pour évaluer la quantité du carbone (q) dans l'horizon (i) selon la superficie, trois paramètres doivent être estimés [17, 18, 19, 20] :

$$q(i) = 0,1 \times E_i \times da(i) \times C_i$$

Où :

q (i) : contenu en carbone organique, dans l'horizon (i) du sol (t.ha⁻¹),

E_i : épaisseur de l'horizon (i) (cm),

da(i) : densité apparente de la fraction fine (< 2 mm) dans l'horizon (i) (g.cm⁻³),

C_i : concentration du carbone organique dans la terre fine pour l'horizon (i) (g.kg⁻¹).

La quantité totale du carbone (Q) dans le sol jusqu'à une profondeur sélectionnée est la somme des quantités dans chaque horizon :

$$Q = \sum (q(i))$$

3. Résultats et discussion

3.1. Teneur et stock du carbone organique des sols

Teneur en carbone organique des sols

Les résultats de l'analyse du carbone organique, présentés en pourcentages massiques, des échantillons de sols sont regroupés dans le tableau 2. Les teneurs en carbone organique varient de 0,01 % comme valeur minimale à 8,1 % comme valeur maximale. Ces valeurs sont observées respectivement dans les couches 70-100 cm pour

toutes les parcelles et dans les quinze premiers centimètres de la parcelle de la forêt d'Ajdir. D'après le tableau 2, les sols de toutes les parcelles peuplées sont riches en carbone organique (% C \geq 1,7 pour la couche 0-30 cm) sauf la couche 15-30 cm de la parcelle de Reggada (% C = 1,0). Alors que, les clairières sont tous très pauvres en carbone organique dont le (% C \leq 0,4).

Tableau 2.

Teneur en carbone organique (%) des sols des parcelles étudiées.

Profondeur (cm)	0-15	15-30	30-50	50-70	70-100
D. Hachlaf	6,3	2,8	1,3	0,4	0,01
Ajdir	8,1	3,4	1,4	0,5	0,01
Ksiba	3,9	1,7	0,4	0,09	0,09
Tafachna	4,9	1,7	0,7	0,2	0,01
Reggada	2,1	1,0	0,2	0,05	0,01
C _{D.H.}	0,2	0,1	0,03	0,01	0,01
C _{Aj.}	0,3	0,1	0,02	0,01	0,01
C _{Ks.}	0,4	0,1	0,04	0,01	0,01
C _{Ta.}	0,2	0,1	0,03	0,01	0,01
C _{Re.}	0,3	0,1	0,02	0,01	0,01

C_{D.H.}, C_{Aj.}, C_{Ks.}, C_{Ta.} et C_{Re.} sont respectivement les clairières des forêts de Dayat Hachlaf, Ajdir, Ksiba, Tafachna et Reggada.

La teneur en carbone organique varie selon le mode d'occupation et la profondeur du sol. Les parcelles qui contiennent en plus du chêne vert de la cédraie sont plus riches en carbone organique. En effet, la teneur en carbone organique (pour la couche 0-15 cm) est de 6,3 % pour Dayat Hachlaf et de 8,1 % pour Ajdir alors qu'elle varie entre 2 et 5 % pour les autres parcelles. Cette richesse de sols de Dayat Hachlaf et Ajdir en carbone organique peut être expliquée par la vitesse de minéralisation de la matière organique des résineux qui est inférieure à celle des feuillus. En plus, la présence

de gros pieds de cèdre (résineux) entraîne une diminution de la température à la surface du sol (ombre), ce qui retarde la décomposition et la minéralisation de la matière organique.

Stock du carbone organique dans le sol

Les stocks de carbone organique de sols (SCOS) en tonne par hectare et leurs pourcentages dans les dix parcelles à différentes couches (0-15, 15-30, 30-50, 50-70 et 70-100 cm) sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 3.

Stock (tC.ha⁻¹) et pourcentage du stock (%) du carbone organique dans les différentes couches de sols.

Prof. (cm)	Parcelles	D. Hachlaf	Ajdir	Ksiba	Taf.	Reg.	C _{D.H.}	C _{Aj.}	C _{Ks.}	C _{Ta.}	C _{Re.}
0-15	SCOS	66,5	83,9	40,0	52,7	33,2	3,5	4,9	2,3	2,0	4,5
	% SCOS	53,4	59,3	60,0	73,2	63,3	55,6	55,7	57,5	65,7	63,1
15-30	SCOS	28,0	31,7	18,2	10,3	14,0	2,1	2,8	1,2	0,5	1,8
	% SCOS	22,5	22,4	27,8	14,3	26,6	33,3	31,8	30,0	17,0	24,9
30-50	SCOS	22,4	22,2	5,7	7,0	4,1	0,5	0,8	0,3	0,3	0,4
	% SCOS	18,0	15,7	8,7	9,7	7,8	7,9	9,1	7,5	10,4	5,3
50-70	SCOS	7,4	3,4	1,4	1,8	1,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
	% SCOS	6,0	2,4	2,1	2,5	1,8	1,6	2,3	2,5	3,1	2,9
70-100	SCOS	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3
	% SCOS	0,2	0,2	0,4	0,2	0,5	1,6	1,2	2,5	3,8	3,9
0-100	Total	124,6	141,4	65,5	71,9	52,5	6,3	8,8	4,0	3,1	7,2

SCOS : Stock de carbone organique de sols ; Taf : Tafachna et Reg. : Reggada

Les stocks du carbone organique présentent une variabilité très significative selon les différentes couches de sols, ils sont élevés dans la première couche 0-15 cm (entre 53 % et 73 % du SCOS total) pour toutes les parcelles. Les trente premiers centimètres renferment plus des trois quart (entre 76 et 90 %) de la totalité du stock de carbone des sols (Tableau 3). Eglin (2005) et Lecoïnte *et al.*, (2005) [21, 22], pour des forêts britanniques, estiment que le SCOS cumulé dans les 30 premiers centimètres représente entre 68 et 75 % du stock total du carbone organique du sol.

Les corrélations entre le SCOS des différentes couches avec la profondeur du sol sont très

significatives (coefficients de corrélations supérieurs à 0,87). L'approche corrélatrice montre que les stocks de carbone organique de sols sont fortement dépendants de la profondeur pour les différents sites (Figure 1). Ces stocks diminuent selon une courbe exponentielle pour toutes les parcelles. Le SCOS perd entre 55 et 80 % de sa valeur en passant de la couche 0-15 cm à la couche 15-30 cm. Cette décroissance très progressive du SCOS avec la profondeur est une des caractéristiques intéressantes de sa distribution [8, 9, 10, 23], en accord avec la perte très progressive du caractère organique des horizons du sol.

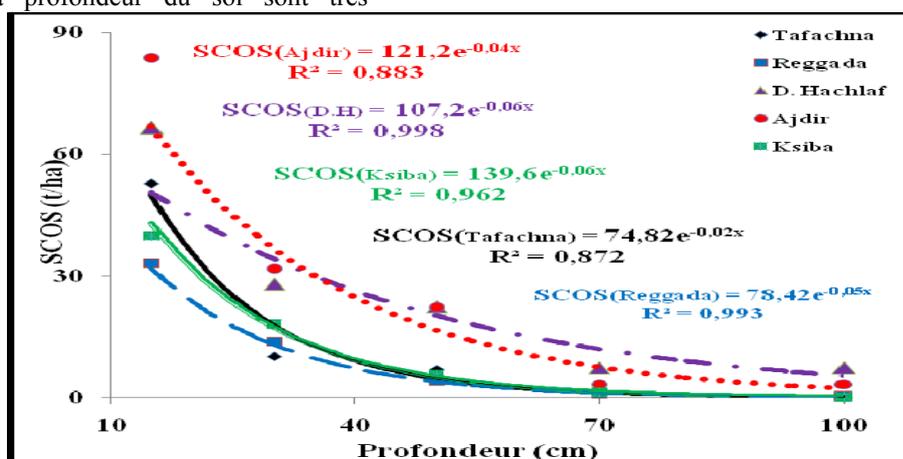


Figure 1. Evolution du stock de carbone organique des sols en fonction de la profondeur.

Le stock du carbone organique des sols total (0-100 cm) varie de 3,1 à 141,4 tC.ha⁻¹ respectivement pour la clairière de Tafachna (C_{Ta}) et la parcelle de la forêt d'Ajdir (Tableau 3). Ainsi, le SCOS (0-100 cm) dans les différentes parcelles (excepte la parcelle d'Ajdir) est inférieur à 125 tC.ha⁻¹, valeur qui reste inférieure aux SCOS (0-100 cm) avancés par Eglin (2005) [21], 153 tC.ha⁻¹ et 136 tC.ha⁻¹ par Lecoïnte *et al.*, (2005) [22].

Les études effectuées par plusieurs auteurs [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30] au Brésil, Jordanie, Inde et Kenya montrent que les stocks de carbone organique varient considérablement en fonction de la nature des sols. Pour une profondeur d'un mètre, les valeurs vont de 12 tC.ha⁻¹ pour les xérosols ou les arénosols à plus de 100 tC.ha⁻¹ pour les podzols. Les quantités totales de carbone organique dans les sols des zones arides (xérosol et yermosol) sont

faibles, autour de 70 tC.ha⁻¹, comparées aux sols des tropiques, de l'ordre de 150 à 300 tC.ha⁻¹.

Pour les parcelles de notre étude, on constate que le stock de carbone organique total (0-100 cm) et le stock de carbone de la première couche (0-15 cm) sont très dépendants de la surface terrière totale des peuplements (Figure 2). Ainsi, ceux des couches (15-30 et 30-50 cm) le sont aussi mais beaucoup moins dépendent que la première couche. Alors que, pour les deux dernières couches (50-70 et 70-100 cm), le stock de carbone organique est presque indépendant de la surface terrière des peuplements. D'autre part, on constate qu'il n'a pas de corrélation entre la densité de peuplement et la quantité de carbone organique séquestré dans le sol. Ceci peut être expliqué par la présence de gros arbre de cèdre dans les parcelles d'Ajdir et de Dayat Hachlaf.

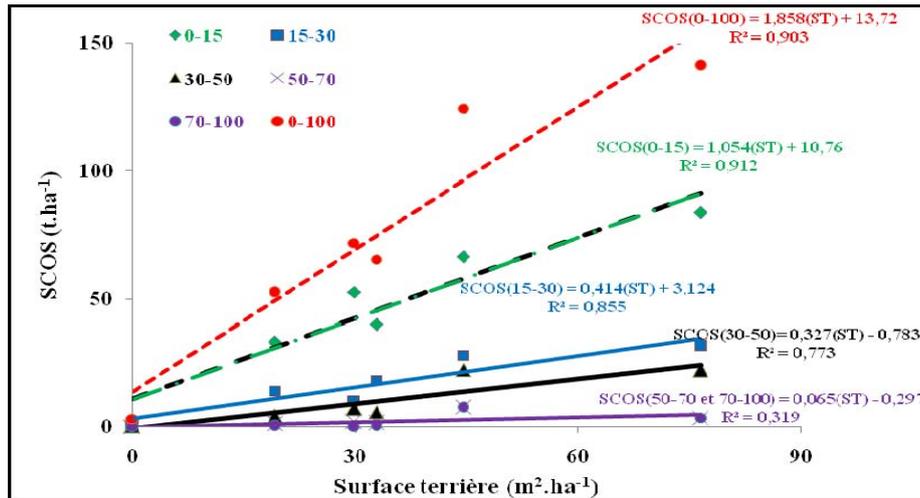


Figure 2. Evolution du stock de carbone organique des sols en fonction de la surface terrière.

3.2. Stock de carbone dans la biomasse aérienne (carbomasse)

Carbomasse des iliçaias

Inventaire et modélisation de la carbomasse

Les structures des peuplements de chêne vert des cinq parcelles expérimentales étudiées du Moyen Atlas marocain ainsi que celles des arbres abattus

sont regroupées dans les histogrammes de fréquences relatives (Figures 3). Les peuplements présentent une structure régulière dont le mode est situé dans la classe de circonférence de 30 cm pour toutes les parcelles sauf pour la parcelle de Ksiba dont le mode de classe de circonférence est situé à 50 cm.

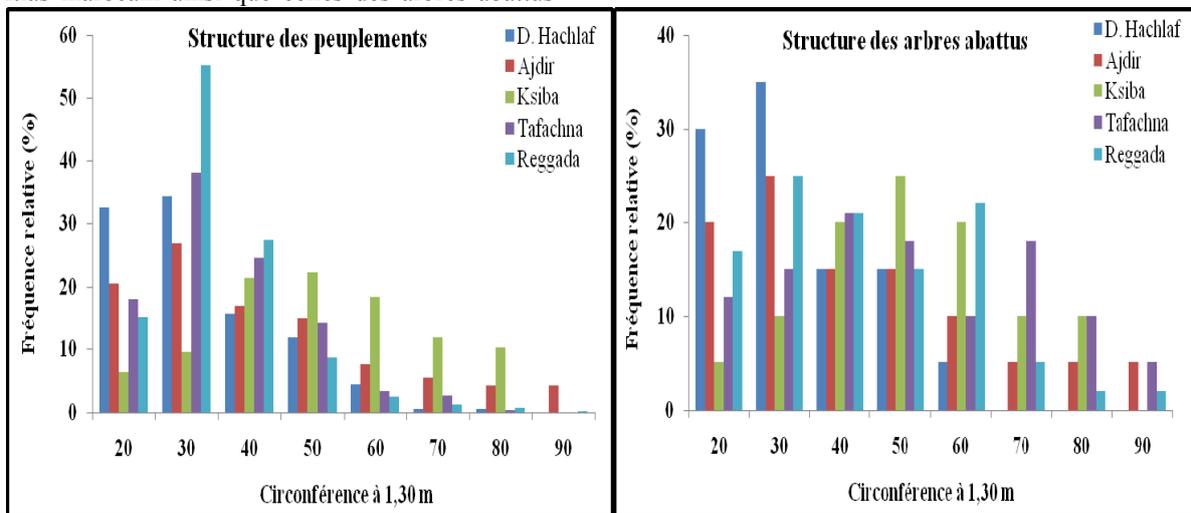


Figure 3. Structure des peuplements de chêne vert et des arbres abattus.

Modélisation de la carbomasse de la partie épigée des arbres abattus de chêne vert

Elle consiste à déterminer la quantité de carbone séquestré dans la partie épigée de l'arbre (carbomasse aérienne). Sa détermination et sa répartition (allocation) dans les différents compartiments de l'arbre (tronc, branches, rameaux

et feuilles), pour les vingt arbres abattus de chaque parcelle, est effectuée relativement à la circonférence à 1,30 m.

Les évolutions des quantités de carbone dans les différentes composantes de l'arbre en fonction de la circonférence à 1,30 m ($C_{1,30}$) sont regroupées dans la figure 4.

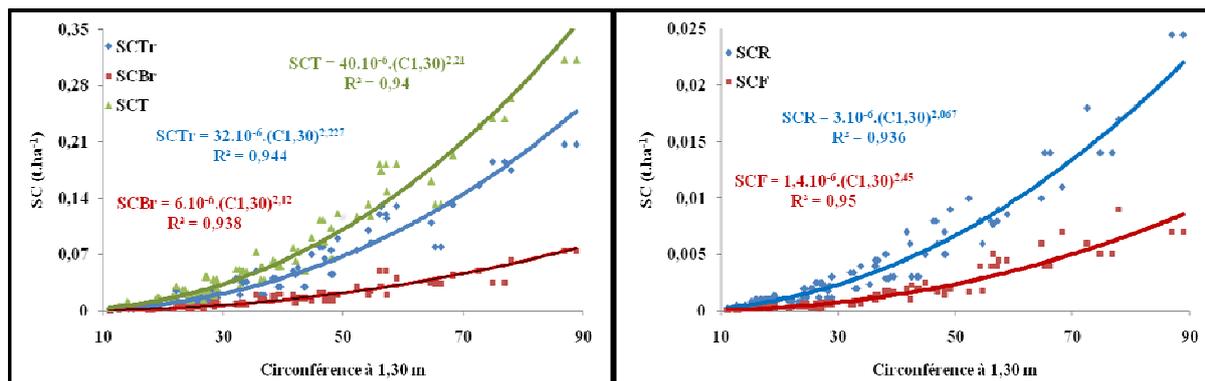


Figure 4. Ajustement de la carbomasse totale et celles des différentes composantes de la partie aérienne du chêne vert.

Les équations de régressions retenues pour la carbomasse totale et celles des différentes composantes de l'arbre en fonction de la circonférence à 1,30 m, pour les cinq parcelles, sont

regroupées dans le tableau 4. Cette production n'a pas tenu compte des petits brins ($C_{1,30} < 10$ cm) et des espèces secondaires qui sont mélangées avec le chêne vert dans un premier temps.

Tableau 4.

Modèles du stock de carbone pour les différentes composantes des arbres abattus.

	Modèles ajustées	R ²
Tronc	$SCTr = 32 \times 10^{-6} \times (C_{1,3})^{2,227}$	0,93
Branches	$SBr = 6 \times 10^{-6} \times (C_{1,3})^{2,12}$	0,94
Rameaux	$SCR = 3 \times 10^{-6} \times (C_{1,3})^{2,13}$	0,94
Feuilles	$SCF = 1,4 \times 10^{-6} \times (C_{1,3})^{2,45}$	0,95
Total	$SCT = 40 \times 10^{-6} \times (C_{1,3})^{2,21}$	0,94

$C_{1,30}$: Circonférence à 1,30 m ; STr, SBr, SCR, SCF et SCT : sont respectivement le Stock de carbone dans le Tronc, les Branches, les Rameaux, les Feuilles et dans la biomasse aérienne Totale ; Les stocks de carbone sont exprimés en kg de matière sèche et $C_{1,30}$ en m.

Les résultats obtenus à partir des équations de régressions du stock de carbone dans la biomasse totale du chêne vert et sa répartition dans les

différents compartiments de la partie érigée de l'arbre sont regroupés dans le tableau 5.

Répartition du stock de carbone ($tC \cdot ha^{-1}$) dans les différentes composantes des iliçaias.

Parcelle	SCTr	SBr	SCRa	SCF	SCT
D. Hachlaf	34,7	11,1	7,2	2,5	55,5
Ajdir	56,0	17,0	11,0	4,5	88,5
Ksiba	57,8	17,7	11,5	4,5	91,5
Tafachna	42,1	8,2	5,2	1,3	56,8
Reggada	30,2	12,7	4,3	1,7	49,9

SCRa : Stock de carbone dans les Racines

La carbomasse de la partie érigée des peuplements de chêne vert du Moyen Atlas varie entre $50 tC \cdot ha^{-1}$ pour la forêt de Reggada et $91 tC \cdot ha^{-1}$ pour la forêt de Ksiba. Les composantes pérennes (tronc et branches) séquestrent plus de 82 % de carbomasse aérienne du chêne vert.

La quantité de carbone qui sera exportée lors d'une coupe à blanc, en considérant que la

biomasse récoltée concerne uniquement le tronc et les branches du chêne vert, varie de 44 à $75 tC \cdot ha^{-1}$. Cette exploitation effectuée pour la production du bois de feu et du charbon, entraîne l'émission entre 161 et $275 tCO_2 \cdot ha^{-1}$ dans l'atmosphère. Avec une moyenne de séquestration de carbone dans la biomasse aérienne des iliçaias de l'ordre de $65 tC \cdot ha^{-1}$, les iliçaias du Moyen (648 10^3 ha) séquestrent dans leurs biomasses aériennes environ $154 MtCO_2$. Ce qui montre que le chêne vert du

Moyen Atlas est un réservoir important de carbone et séquestre quatre fois plus le carbone que les iliçaias du Haut Atlas (39 MtC.ha⁻¹) [31] même si la différence en superficie est de l'ordre de 50 % (Superficie occupé par le chêne vert du Haut Atlas est de 409 10³ ha).

Carbomasse dans le peuplement associé (cèdre)

Les structures des peuplements de cèdre dans les parcelles de Dayat Hachlaf et Ajdir sont regroupées les histogrammes de la figure 5.

Le stock de carbone dans le peuplement de cèdre est de 34,8 tC.ha⁻¹ pour Dayat Hachlaf et de 66,1 tC.ha⁻¹ pour Ajdir.

Les résultats obtenus montrent que le stock de carbone dans les iliçaias et dans la cédraie des forêts de Dayat Hachlaf et Ajdir sont comparables même si le pourcentage du nombre de pieds de cèdre ne dépasse pas 6,5 % de la densité totale des. En effet, le rapport [(carbomasse aérienne du cèdre)/(carbomasse aérienne du chêne vert)] est de

l'ordre de 0,6 pour Dayat Hachlaf et de 0,7 pour Ajdir.

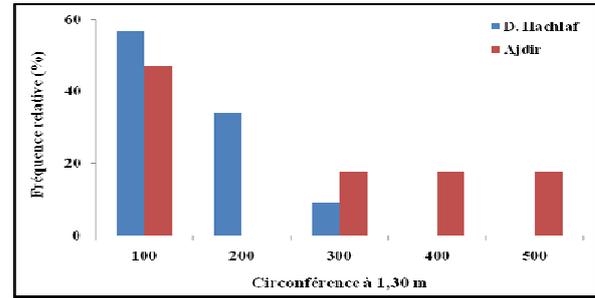


Figure 5. Structure du peuplement de cédraie dans les parcelles de Dayat Hachlaf et Ajdir.

La carbomasse totale augmente avec la surface terrière totale des peuplements (Figure 6

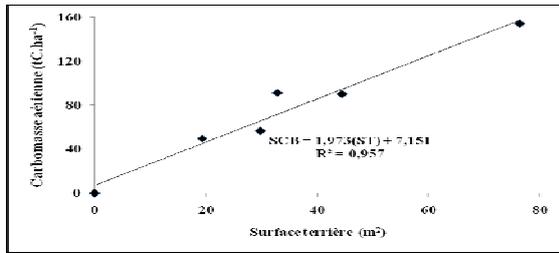


Figure 6. Evolution de la carbomasse dans la biomasse aérienne en fonction de la surface terrière des peuplements.

3.3. Stock du carbone organique dans la litière

Les résultats du stock du carbone organique dans la litière au sol (SCL) sont regroupés dans le

Tableau 6.

Stock de carbone dans la litière au sol (tC.ha⁻¹).

Parcelle	D.H.	Ajdir	Ksiba	Taf.	Reg.	C _{D.H.}	C _{Aj.}	C _{Ks.}	C _{Taf.}	C _{Reg.}
SCL	11,2	14,3	8,1	8,7	3,5	0,7	0,6	0,3	0,5	0,2

D.H. : Dayat Hachlaf ; Taf. : Tafachna et Reg. : Reggada.

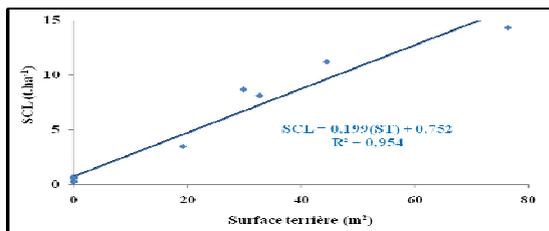


Figure 7. Evolution du SCL en fonction de la surface terrière.

tableau 6. Le SCL varie de 0,2 tC.ha⁻¹ pour la clairière de Ksiba (C_{Ks.}) à 14,3 tC.ha⁻¹ pour la forêt d'Ajdir.

La surface terrière totale (ST) des peuplements a un effet très marquant sur la séquestration du carbone dans la litière au sol (Figure 7). En effet, le SCL à Ajdir (ST = 76,4 m².ha⁻¹) dépasse 14 tC.ha⁻¹ alors que celui à Reggada (ST = 19,3 m².ha⁻¹) ne dépasse pas 3,5 tC.ha⁻¹.

Pour une moyenne du stock de carbone dans la litière au sol de l'ordre de 8 tC.ha⁻¹, les écosystèmes des iliçaias du Moyen Atlas stockent dans leur litière au sol plus de 5,2 MtC (19 MtCO₂).

Les SCL des forêts étudiées restent très faibles comparativement aux stocks de carbone dans la litière au sol dans les forêts tropicales et tempérées qui peuvent atteindre respectivement jusqu'à 60 et 90 tC.ha⁻¹ [32].

Comparativement aux pourcentages du stock de carbone de la carbomasse aérienne (entre 40 et 55 %) et celui des sols (SCOS + SCL) (entre 40 et 55 %), par rapport au stock de carbone total des sites d'études, le poucentage du SCL ne dépasse pas 6 % du SCOT. Les résultats obtenus montrent que le

stock de carbone total (biomasse, litière et sol) est très dépendant de la surface terrière (Figure 8) et il varie de 106 à 310 tC.ha⁻¹ respectivement pour Reggada et Ajdir (Tableau 7).

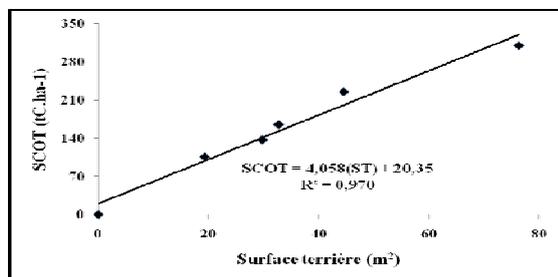


Figure 8. Evolution du SCO total en fonction de la surface terrière.

Tableau 7.

Stock total du carbone (tC.ha⁻¹)

	D.H	Ajdir	Ksiba	Taf.	Reg.
SCOT	226,1	310,3	165,4	137,4	105,9

D.H., Taf. et Reg. Sont respectivement Dayat Hachlaf, Tafachna et Reggada

Avec une moyenne du stock de carbone total (biomasse, sol et litière) de l'ordre de 190 tC.ha⁻¹, les écosystèmes des iliçaias du Moyen Atlas (648 10³ ha) séquestrent environ 460 MtCO₂. Ainsi, les écosystèmes des iliçaias du Haut Atlas marocain séquestrent environ 120 MtCO₂ [31]. Par conséquent, les iliçaias du Moyen et Haut Atlas marocains emmagasinent environ 580 MtCO₂. Avec un âge moyen de 80 ans, les iliçaias marocains séquestrent en moyen 7 MtCO₂.an⁻¹. Ce qui représente presque 1/10 des GES émis annuellement par les marocains [2]. En effet, l'estimation des émissions nettes des GES au Maroc en 2010 est de l'ordre de 75,4 MtCO₂eq.

Après avoir estimé le stock de carbone dans les cinq forêts du Moyen Atlas marocain, on calcul la contribution du stock produits bois (SPB) et la substitution énergétique (SE) à l'évitement de l'émission de plus de CO₂ dans l'atmosphère.

Stock produits bois

Dans l'estimation du stock de carbone dans les produits de bois, nous avons utilisé la méthodologie CCX (Chicago Climate Exchange) de calcul de la prolongation du stockage de carbone dans les produits bois. Cette méthodologie octroie un crédit carbone pour chaque tonne de CO₂ contenue dans les produits-bois (en usage ou enfouie en décharge) et qui n'a pas été réémise dans l'atmosphère après la récolte. Les coefficients CCX présentés pour le

bois d'œuvre sont de 0,276 pour les feuillus et 0,350 pour les résineux [33]. L'application du coefficient des résineux (0,350) pour la cédraie, nous a permis de calculer la valeur du stockage de carbone dans les produits bois (bois d'œuvre) qui est de 12,2 tCO₂.ha⁻¹ pour Dayat Hachlaf et 23,1 tCO₂.ha⁻¹ pour Ajdir.

Substitution énergétique

Les calculs utilisent la valeur moyenne par défaut du contenu énergétique suivant : une tonne de matière sèche (TMS) de bois produit 2,93 kWh soit 10,56 GJ (CITEPA, 2007) [34]. On applique ensuite la moyenne des facteurs d'émission de CO₂ par GJ d'énergie générée du charbon, du fiol domestique et du gaz naturel utilisés par le CITEPA (en accord avec les recommandations du GIEC), soit 0,8 tCO₂ évitées par TMS de bois (presque 0,5 tonne de carbone) utilisée. Les quantités évitées du dioxyde de carbone dans l'atmosphère par l'utilisation du bois de chêne vert (bois destiné à l'énergie) dans les différentes parcelles sont regroupées dans le tableau 8.

Tableau 8.

Quantité du dioxyde de carbone (tCO₂.ha⁻¹) évitée par substitution énergétique.

	D.H.	Aj.	Ks.	Taf.	Reg.
SCB _{CV}	45,8	73,0	75,5	50,3	42,9
Q(CO ₂) évité	73,3	116,8	120,2	80,5	68,6

Q(CO₂) : Quantité de CO₂ ; Aj. : Ajdir et Ks. : Ksiba.

4. Conclusion

La quantité de carbone organique des sols diminue en fonction de la profondeur, pour toutes parcelles d'étude en suivant une courbe exponentielle à exposant négatif. Le pourcentage du stock de carbone diminue de plus de 54 % en passant de la couche 0-15 cm à la couche 15-30 cm. Ainsi, le SCOS perd entre 57 et 85 % de sa valeur en passant de la couche 15-30 cm à la couche 30-50 cm.

Cette étude montre également que SCOS dans la couche 0-100 cm des sols des iliçaias du Moyen Atlas varie de 65 à 141 tC.ha⁻¹.

La carbomasse aérienne moyenne est de l'ordre de 89 tC.ha⁻¹ et elle est importante dans les forêts qui contiennent de la cédraie (Dayat Hachlaf 90,3 tC.ha⁻¹ et Ajdir 154,6 tC.ha⁻¹). Alors que, le stock de carbone dans la litière au sol est faible comparativement à la carbomasse et le SCOS et il ne dépasse pas 14 tC.ha⁻¹.

Les stocks de carbone organique dans les différents compartiments (biomasse, litière et sol) des iliaïes du Moyen Atlas sont très dépendants de la surface terrière des peuplements.

Les forêts des iliaïes du Moyen et Haut Atlas marocains séquestrent annuellement environ 7 MtCO₂.

Ces résultats confirment le rôle important des forêts naturelles comme puits d'emmagasinent à long terme du carbone organique dans la biomasse forestière, la litière et le sol.

5. Bibliographi

- [1] Communication National Initiale à la CCNUCC, 2001. Royaume du Maroc. 101 pages.
- [2] Seconde Communication Nationale à la CCNUCC, 2010. Royaume du Maroc. 193p + annexes
- [3] C.R. KABWE, 2009. Rapport des activités réalisées dans le cadre du programme africain : climate change fellowship program. 54 pages.
- [4] M. Qarro, F.X. Montaed, 1992. Etude de la productivité des parcours de la zone de Aïn-Leuh (Moyen Atlas - Plateau central). II : modélisation de la production de l'herbe. *Agronomie*, 12 : 489-501.
- [5] A. Benabid, M. Fennane, 1999. Principales formations forestières. *Gra. Liv. For. Mar. Maroc*, 12 : 71-93.
- [6] GIEC, 2001. Changements climatiques: Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs. 37p.
- [7] GIEC, 2007. Changements climatiques : Bilan des changements climatiques : Rapport de synthèse. Publié à l'intention des décideurs. 114 p.
- [8] M. Boulmane, M. Halim., S. El Antry-Tazi, K. Berred, H. El Harchaoui, 2007. Evaluation du stock du carbone et dynamique de la décomposition de la matière organique dans les sols de la Maâmora. *Ann. Rech. For. Maroc*, 39 : 185-194.
- [9] M. Boulmane, M. Makhoulfi, J.P Bouillet, L. Saint-André, B. Satrani, M. Halim, S. El Antry, 2010. Estimation du stock de carbone organique dans les *Quercus ilex* du Moyen Atlas Marocain. *Acta bot. Gallica*, 157 : 451-467.
- [10] T. Ouagga, 2005. Etude l'effet des modes d'occupation des sols sur la séquestration du carbone et l'agrégation des sols dans le bassin versant de la Rheraya (Haut Atlas du Maroc). Mémoire de 3^{ème} Cycle, ENFI, Salé-Maroc, 94p + annexes.
- [11] J. Walkley, W. Black, 1934. An experimentation of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37 : 29-38.
- [12] O. M'hirit, M. Benziane, 2006. Le cèdre de l'Atlas : Mémoire du temps. Edition Mardaga, Sprimont-Belgique, 288p.
- [13] B. Nadhem, 2011. Réchauffement climatique & vulnérabilité des sols méditerranéens: spatialisation et séquestration du carbone en Tunisie. Mémoire de doctorat, Faculté des Sciences de Tunis, Tunis, 271p + annexes.
- [14] M. Rapp, I. Santa-Regina, M. Rico, H.A. Gallego, 1999. Biomass, nutrient content, litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forests. *For. Eco. Manag.*, 119 : 39-49.
- [15] H. Davi, E. Dufrêne, A. Granier, V. Le Dantec, C. Barbaroux, C. François, C. Bréda, 2005. Modelling Carbon and water cycles in a beech forest Part II: Validation of the main processus from organ to stand scale. *Ecology Modelling*, 1 : 1-19.
- [16] L. Saint-André, N. Picard, 2005. Construire des tarifs de cubages, biomasses, minéralomasse. Edité par l'INRA-Nancy. France, 26 p.
- [17] C. Peng, J. Liu, M. Apps, Q. Dang, W. Kurz, 2000. Quantifying Ontario's forest carbon budget : 1 Carbon stock and flux of forest ecosystems. *For. Res. Rep.*, 158 : 123-137.
- [18] C.E.P. Cerri, M. Easter, K. Paustian, K. Killian, K. Coleman, M. Bernoux, P. Falloon, D.S. Powlson, N. Batjes, E. Milne, C.C. Cerri, 2007a. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the brazilian amazon with RothC and centry models. *Agr. Ecos. Environ.*, 1 : 1-12.
- [19] J. Evans, I.J. Fernandez, L.E. Rustad, S.A. Norton, 2001. Methods for evaluating fractions in forest soil. *Technical Bulletin*, 178 : 34-45.
- [20] S. Belkacem, C. Nys, J.L. Dupouey, 1998. Evaluation des stocks de carbone dans les sols forestiers : importance de la sylviculture et du milieu sur la variabilité. Edité par INRA/DPE, Agrigès, 68 pp.
- [21] T. Eglin, 2005. Impact de l'hydromorphie et la topographie sur la variabilité spatiale des stocks de carbone en forêt de Fougères (Ille-et-Vilaine). Thèse INA, Paris-Grignon, 50p.
- [22] S. Lecoïnte, C. Nys, C. Walter, F. Forgeard, S. Huet, P. Recena, S. Follain, 2005. Estimation of carbon stocks in a beech forest (Fougères Forest): extrapolation from plots to the whole forest. *Ann. Forest Sci.*, 25 : 432-451.
- [23] P.I.A. Hounzandji, 2009. Effet des transformations des écosystèmes naturels (*Cedrus Atlantica*, *Quercus Rotundifolia*) sur la séquestration de carbone dans le Moyen Atlas (Forêt d'Azrou). Mémoire de 3^{ème} Cycle, ENFI, Salé-Maroc, 117p + annexes.
- [24] N.H. Batjes, 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European J. Soil Sci.*, 47 : 151-163.
- [25] N.H. Batjes, 2004a. Estimation of soil carbon gains upon improved management within croplands and grasslands of Africa. *Envi. Dev. Sustainability*, 6 : 133-143.
- [26] N.H. Batjes, 2004b. Soil carbon stocks and projected changes according to land use and management: a case study for Kénya. *Soil Use Management*, 20 : 350-356.
- [27] N.H. Batjes, 2005a. Soil carbon stocks and projected changes within croplands in Jordan. *Geoderma*, 25 : 415-423.
- [28] N.H. Batjes, 2005b. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use Management*, 21 : 22-24.
- [29] P. Droogers, J. Bouma, 1997. Soil survey input in exploratory modeling of sustainable management practice. *Am. J. Soil Sci. Soc.*, 61 : 1704-1710.
- [30] J. Bouma, N.H. Batjes, J.J.R. Groot, 1998. Exploring land quality effects on world food supply. *Geoderma*, 86 : 43-59.
- [31] M. Boulmane, I.S. Regina, 2013. Estimation du stock de carbone dans les iliaïes du Haut Atlas Marocain. *Ann. Rech. For. Maroc*, en presse.
- [32] J.L. Dupouey, G. Pignard, V. Badeau, A. Thimonier, J.F Dhôt, G. Nepveu, L. Bergès, L. Augusto, S. Belkacem, C. Nys, 1999. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. CRAAF, Edition Académie des Sciences Française, Paris, 85 : 278-292.
- [33] M. Deheza, V. Bellasen, 2010. Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France. ACD climate recherche, N°20,51p.
- [34] CITEPA, 2007. Rapport du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique : Bilan des émissions de gaz à effet de serre de la France en 2007.