

Biomasse ligneuse et foliaire des taillis d'arganier dans le plateau des Haha (Maroc)

par Tarik BELGHAZI, Quentin PONETTE, Mathieu JONARD
et Bakhiyi BELGHAZI

L'arganeraie est une formation extrêmement importante au Maroc, aussi bien du point de vue écologique qu'économique. Elle « donne tout » aux populations locales : bois, huile, feuillage pour les animaux... Il est donc important de pouvoir estimer la biomasse ligneuse fournie par ces peuplements, notamment dans un contexte de fortes pressions climatiques et anthropiques. C'est ce que se sont proposés de faire les auteurs dans cet article.

Introduction

L'estimation de la biomasse forestière est une question très ancienne (BOYSEN-JENSEN et MÜLLER, 1927) qui a connu un regain d'intérêt suite à l'établissement de la convention du climat et du protocole de Kyoto (NABUURS *et al.*, 2003 ; JALKANEN *et al.*, 2005) ; la biomasse végétale constitue un compartiment clé du cycle du carbone terrestre (CAIRNS *et al.*, 2000). En effet, les écosystèmes forestiers contribuent au cycle global du carbone et aident à atténuer les effets du changement climatique (CANADELL et RAUPACH, 2008 ; LE QUERE *et al.*, 2009 ; LEWIS *et al.*, 2009). Ainsi, il n'est pas étonnant que durant les quatre dernières décennies, les travaux de recherche qui s'intéressent à la production en biomasse des forêts n'ont cessé de prendre de l'importance (WARING et RUNNING, 1998).

Les forêts méditerranéennes, contrairement à celles des régions tempérées, tropicales ou équatoriales, ont été relativement peu étudiées de ce point de vue (SHAIEK *et al.*, 2010). Cela tient notamment à leur faible productivité ligneuse commerciale, qui ignore leur rôle dans la protection contre l'érosion et la dégradation des sols ou la régulation du cycle hydrologique, pourtant d'une acuité toute particulière dans cette région dont le climat présente des contrastes saisonniers importants (CABANETTES et RAPP, 1978).

Parmi ces forêts méditerranéennes, l'arganier (*Argania spinosa*) est l'une des essences forestières les plus originales d'Afrique du Nord. Cette essence endémique du sud-ouest du Maroc, s'étend sur une superficie de 868 034 ha (IFN, 1999), ce qui la place au deuxième rang parmi

les essences forestières du pays. Son aire biogéographique s'étend sur une importante région couvrant la plaine du Souss, l'Anti-Atlas, le Haut-Atlas et le plateau des Haha.

Par ailleurs, l'arganeraie est le pivot d'un système agraire traditionnel fondé sur l'exploitation de l'arbre, l'élevage et la céréaliculture (BENCHERKOUN et BUTTOUD, 1989). En effet, l'arganier est une essence à usages multiples : il fournit du bois énergie et de service très recherché dans la région, de l'huile de table prisée au niveau national, de l'huile cosmétique de renommée internationale, du feuillage qui constitue un pâturage suspendu consommé au niveau des cimes par les chèvres et les chameaux. C'est à ce propos qu'Emberger (1939) considérait l'arganier comme une essence qui « donne tout » et est alors, une providence pour les populations du sud.

En dehors de quelques études biogéographiques et écologiques (EMBERGER, 1938, 1939 ; BARBERO *et al.*, 1982 ; PELTIER, 1982), les études de biomasse et de phytomasse n'étaient pratiquement jamais abordées.

L'estimation de la biomasse ligneuse des peuplements d'arganier est très utile pour l'élaboration du bilan énergétique au niveau des usagers de la forêt : comparer l'offre et la demande en vue d'envisager des solutions alternatives face à une demande toujours supérieure à l'offre, sachant que le bois d'arganier est d'un excellent pouvoir calorifique et est alors très utilisé comme bois énergie. De même, l'estimation de la biomasse foliaire, principal fourrage aérien pour une pléthore de chèvres dans la région, permettrait d'évaluer le stock de fourrage aérien potentiel et servir pour une éventuelle réglementation du parcours en forêt.

C'est dans cet esprit qu'on se propose d'étudier cette problématique dans le plateau des Haha (Province d'Essaouira) où le système « arganier et population riveraine » domine tout autre système d'exploitation dans la région. L'évaluation des biomasses ligneuse et foliaire des jeunes taillis d'arganier contribueraient à mettre au point des règles de production adéquates pour une gestion durable de cette forêt.

**De haut en bas,
et de gauche à droite :**

Photo 1 :
Jeune taillis d'arganier
âgé de 10 ans.

Photo 2 :
Jeune cépéé d'arganier.

Photo 3 :
Mesure du poids
d'un brin d'arganier.

Photo 4 :
Feuilles d'un brin
d'arganier.



1



2



3



4

Matériel et méthodes

Site

Les peuplements d'arganier qui ont fait l'objet de cette étude sont répartis sur l'ensemble du plateau des Haha qui relève de la province d'Essaouira. Située entre 30°45' N et 31°26' N, la région est d'une forme tabulaire marquée par quelques collines, d'altitudes relativement faibles : le point culminant se situe à 1 614 m d'altitude au Jbel Taleza.

Le domaine forestier qui s'étend sur 229 886 hectares (66 % de la superficie totale du plateau) (TRAORÉ, 1993) est dominé par l'arganier. Le thuya (*Tetraclinis articulata*), à l'état pur ou mélangé à l'arganier, occupe les stations relativement fraîches.

Sur le plan climatique, le plateau des Haha est typiquement méditerranéen, il subit en été, saison chaude et sèche, l'influence tropicale venant du sud et du sud-est (vents chauds dits chergui) ; en hiver, saison froide et pluvieuse, les vents du nord ou du nord-ouest descendant des régions septentrionales et apportent de l'humidité et de la fraîcheur. Le bioclimat est du type semi-aride frais à tempéré au sens d'Emberger (1955). En effet, face à une forte évaporation, la pluviométrie moyenne (250 à 300 mm/an) reste malgré tout, non seulement faible, mais aussi sans grande signification puisque très irrégulière. De ce fait, et bien que la lithologie majoritairement calcaire soit favorable à la mise en réserve d'énormes quantités d'eau, les ressources hydriques du sol restent quand même très limitées.

Sur le plan pédologique, une récente étude dans la région d'Amsiten au cœur du plateau des Haha (ESSAGHI, 2012) montre que les principales classes de sols rencontrées sont : des sols minéraux bruts, sols peu évolués, sols calcimagnésiques, isohumiques et des sols à sesquioxides de fer. Selon cet auteur, les sols minéraux bruts et peu évolués représentent 48 % des sols de la région.

Collecte des données

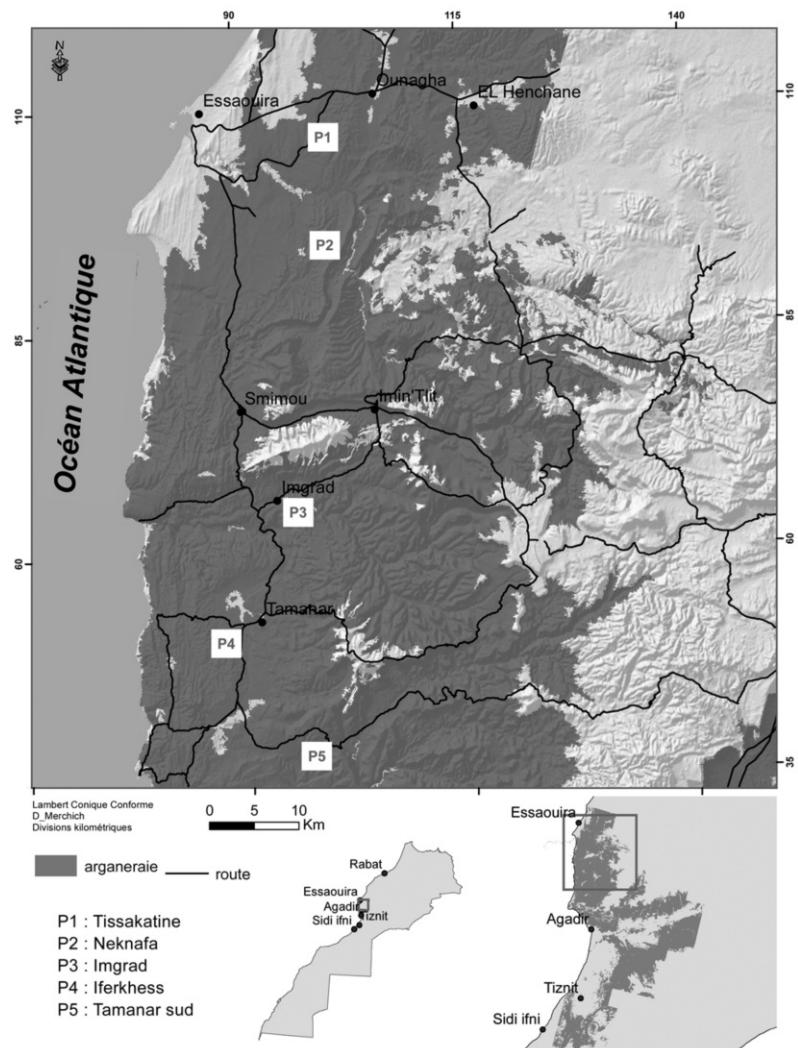
Echantillonnage

Une première campagne d'échantillonnage a concerné les taillis de Neknafa, Imgrad et Tissakatine, âgés respectivement de 5, 10 et 15 ans, n'ayant subi aucun traitement sylvicole. Au niveau de ces peuplements, un échantillon de 60 placettes circulaires de

1256 m² de superficie (20 mètres de rayon), réparties d'une manière aléatoire à raison de 20 placettes par peuplement, a été inventorié. Dans une deuxième campagne d'inventaire, un échantillon de 15 placettes de même superficie a été réalisé dans chacun des taillis d'Iferkhess3 et de Tamanar_sud1, âgés respectivement de 15 et 12 ans. Au total, 823 cépées ont été inventoriées au niveau de ces cinq peuplements (Cf. Fig. 1).

Par ailleurs, la biomasse des brins a été estimée à partir d'un échantillon de 123 cépées pour les cinq peuplements considérés (une cépée sur 7 en moyenne). En considérant la structure des tours de taille à 1,30 m des cépées par peuplement, l'échantillon a été choisi d'une manière à couvrir proportionnellement toutes les classes de taille rencontrées. Ainsi, au niveau de chaque cépée échantillon, un brin dominant, un brin moyen et un brin dominé (sur base de leur grosseur) ont été prélevés. Un total de 369 brins a été analysé.

Fig. 1 (ci-dessous) :
Localisation géographique des peuplements étudiés.



Mesures

Les cépées ont fait l'objet de mesures de différentes variables dendrométriques, à savoir le nombre de rejets par cépée, la taille de tour à 1,30 m du sol de la cépée à l'aide d'un décamètre, les deux diamètres perpendiculaires au sol de la projection orthogonale du houppier pour estimation de la surface de projection (la première direction étant choisie au hasard), la circonférence à 1,30 m de tous les brins de la cépée et la hauteur totale de trois gros brins par souche.

Pour ce qui est des 369 brins prélevés, ils ont fait l'objet de mesures de hauteur totale, de circonférences à la base (20 cm), à 50 cm, 1 m, 1,30 m, 2 m, 2,5 m et 3 m du sol ainsi que des pesées fraîches de bois et de feuilles séparément.

Pour calculer les taux d'humidité des brins, un échantillon par compartiment (bois et feuilles) a été prélevé. L'utilisation d'une étuve à la température de référence de 65 °C jusqu'à poids constant et d'une balance électronique a permis d'avoir les poids secs des différentes composantes des brins.

Les caractéristiques dendrométriques des cinq peuplements inventoriés sont illustrées dans le tableau I.

Analyse des données

Plusieurs travaux de recherches ont été consacrés à l'estimation de la biomasse individuelle des arbustes et arbres forestiers (MURRAY et JACOBSON, 1982 ; FRANDSEN, 1983 ; NAVAR *et al.*, 2002). Ces estimations sont fondées très souvent sur l'ajustement de modèles mathématiques appropriés (WOODS *et al.*, 1991). Une de ces méthodes est basée sur l'utilisation de relations allométriques (WHITTAKER et WOODWELL, 1968) qui permet de mettre en relation la taille et la masse des arbres (XING *et al.*, 2005).

Tab. I (ci-dessous) :
Caractérisation dendrométrique des cinq peuplements étudiés.

Les équations les plus largement utilisées pour la modélisation de la biomasse des différentes composantes de l'arbre lient cette dernière soit au diamètre de la souche ou celui à 1,30 m du sol, soit à la hauteur totale de l'arbre (BROWN, 1997 ; NAVAR *et al.*, 2003). Les meilleures estimations ont été obtenues en utilisant une combinaison de ces deux variables (ZEWIDIE *et al.*, 2009). En effet, le paramètre C^2H est souvent utilisé dans les équations de biomasse et donne les meilleures estimations (CARVALHO et PARRESOL, 2003). Dans la présente étude, les deux catégories de modèles envisagés sont décrites dans ce qui suit.

Modèles de biomasse ligneuse et foliaire

La biomasse ligneuse et foliaire (Y) des brins au niveau des cinq peuplements étudiés a été ajusté par un modèle non linéaire en C^2H sous la forme : $Y = a + b (C^2H)^g$ (C étant la circonférence à la base ou à 1,30 m du sol en centimètres, H la hauteur totale du brin en mètres ; a , b et g représentent les coefficients de régression à estimer). Cette expression mathématique a été choisie de façon à utiliser des paramètres ayant une signification biologique pour être en mesure d'expliquer leur variabilité.

Dans un premier temps, l'ajustement du modèle global en fonction de la valeur des paramètres a , b et g , permet de comparer les différents modèles exposés ci-dessous.

- I.1. $Y = a + b ((C^2H)^g)$
- II.1. $Y = b (C^2H)^g$; avec $a = 0$
- III.1. $Y = a + b C^2H$; avec $g = 1$
- IV.1. $Y = b C^2H$; avec $a = 0$ et $g = 1$

Dans un deuxième temps, l'ajustement concerne d'autres modèles spécifiques à chacun des cinq peuplements étudiés. En fonction de la variabilité des coefficients a , b et g ,

Peuplement	Age (ans)	Superficie (ha)	Nombre cépées par ha	G (m ² /ha)	Valeurs moyennes Cépée						Valeurs moyennes Brin		
					Taille (m)	Nombre brins	G (dm ²)	V (m ³)	S (m ²)	Hdom (m)	Nombre par ha	C (cm)	
Neknafa	5	199,5	75	0,73	9,5 (0,3)	26 (1,1)	0,97 (0,06)	13,3 (0,9)	12,6 (0,8)	2,1 (0,05)	1926	8 (0,1)	
Imgrad	10	30	118	1,51	10,3 (0,3)	25 (1,2)	1,28 (0,09)	19,5 (1,6)	16,5 (1)	2,4 (0,05)	2993	7 (0,2)	
Tamanar_sud1	12	258	91	1,89	14,2 (0,5)	25 (1,6)	2,08 (0,17)	41,8 (4,7)	23,7 (1,8)	3,5 (0,1)	2280	10 (0,3)	
Iferkhess3	15	149	111	1,59	12,6 (0,5)	23 (1,3)	1,44 (0,15)	28 (2,9)	19,4 (1,5)	2,8 (0,08)	2482	8 (0,3)	
Tissakatine	15	37	82	2,60	14,1 (0,4)	26 (1,3)	3,17 (0,21)	26,6 (1,8)	16,2 (1)	3,3 (0,08)	2164	12 (0,3)	

G : surface terrière ; V : volume occupé en assimilant la cépée à un paraboloïde de révolution (0,5 * S * Hdom) ; S : surface de projection au sol du houppier assimilée à une ellipse ; Hdom : hauteur dominante ; C : circonférence à 1,30 m du sol. (*) : limite de confiance à 95 %.

différentes combinaisons résumées dans l'en-cadré ci-contre.

Au niveau du jeu de données, des variables muettes prenant les valeurs : 0 ou 1 en fonction du peuplement, ont été introduites. Ces variables permettent de prendre en considération la valeur du peuplement dans le processus de modélisation de la biomasse. Il est à signaler aussi qu'une transformation logarithmique est souvent utilisée pour obtenir des variances homogènes. Cependant cette transformation présente de forts inconvénients au moment de revenir à l'échelle d'origine (WUTZLER *et al.*, 2008). Ainsi la variance résiduelle a été modélisée par une fonction de puissance exprimée par l'équation suivante : « $\text{Var} = \sigma^2 (C^2H)^{2k}$ » à l'aide de la fonction « *gnls* » du logiciel R. Il est à signaler également que le modèle de biomasse retenu sera confronté au modèle (IV.2) où le paramètre « *b* » peut être interprété comme étant une expression de la masse volumique ($b = \rho f/4\pi$, *f* étant le coefficient de forme). Ces différents modèles ont été ajustés au moyen du logiciel statistique R (R Development Core Team, 2010).

A la suite de tous les calculs d'ajustement, le modèle retenu est fondé sur les p-valeurs du test de différence entre régression (MAYER *et al.*, 1994). Ce test consiste à comparer par la statistique F de Fisher les estimations obtenues à l'aide du modèle étudié aux valeurs observées par un modèle de régression ayant la valeur de 0 comme ordonnée à l'origine et l'unité comme pente. Le modèle est d'autant meilleur que la valeur de *p* est supérieure à 0,05 (ADU-BREDU *et al.*, 2008). Ensuite, les deux critères de sélection utilisés sont AIC (*Akaike Information Criterion*) proposé par AKAIKE (1974) et BIC (*Bayesian Information Criterion*) proposé par SCHWARTZ (1978). Ces critères ont été largement discutés par RAFTERY *et al.* (2005), BURNHAM et ANDERSON (2002) et POSADA et BUCKLEY (2004).

Dans le cas où ces deux critères montrent des valeurs proches pour deux équations différentes, un test du rapport de vraisemblance s'impose. Si la différence s'avère non significative, le modèle retenu sera celui qui comporte le moins de variables explicatives en concordance avec le principe de parcimonie.

Il est à signaler également qu'une approche de modélisation à effets mixtes a été utilisée. Cette démarche permettra d'élargir leur utilisation à d'autres peuplements de la région.

- I.2. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *a*, *b* et *g* variables ;
- I.3. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *a* et *b* variables, *g* est commun à tous les peuplements ;
- I.4. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *a* et *g* variables, *b* est commun à tous les peuplements ;
- I.5. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *b* et *g* variables, *a* est commun à tous les peuplements ;
- I.6. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *a* variable, *b* et *g* sont communs à tous les peuplements ;
- I.7. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *b* variable, *a* et *g* sont communs à tous les peuplements ;
- I.8. $Y = a + b (C^2H)^g$; avec *g* variable, *a* et *b* sont communs à tous les peuplements ;
- II.2. $Y = b (C^2H)^g$; avec *b* et *g* variables ;
- II.3. $Y = b (C^2H)^g$; avec *b* variable et *g* est commun à tous les peuplements ;
- II.4. $Y = b (C^2H)^g$; avec *g* variable et *b* est commun à tous les peuplements ;
- III.2. $Y = a + b C^2H$; avec *a* et *b* variables ;
- III.3. $Y = a + b C^2H$; avec *a* variable et *b* est commun à tous les peuplements ;
- III.4. $Y = a + b C^2H$; avec *b* variable et *a* est commun à tous les peuplements ;
- IV.2. $Y = b C^2H$; avec *b* variable.

Par ailleurs, le test d'efficience de modélisation (LOAGUE et GREEN, 1991 *in* MAYER et BUTLER, 1993) a été employé pour le choix du bon modèle. La valeur de ce test est donnée par la formule suivante :

$$e.f = 1 - \frac{\sum (y - ye)^2}{\sum (y - ym)^2}$$

avec *y* : valeurs observées, *ye* : valeurs estimées et *ym* : moyenne des valeurs mesurées.

Modèles complexes de biomasse foliaire

Afin d'améliorer la précision des modèles de biomasse foliaire, deux nouvelles variables ont été introduites dans le modèle de base retenu. Il s'agit en premier lieu du facteur d'élancement qui est le rapport de la hauteur totale du brin sur sa circonférence à 1,30 m du sol (H/C) et en second lieu du rapport de la surface terrière du brin sur la somme des surfaces terrières de tous les brins de la souche (Gb/G). Ces deux variables représentent un indice de densité ou de compétition et permettent de rendre compte du statut social du brin à l'intérieur de la souche.

Résultats

Choix des modèles

(circonference au collet ou à 1,30 m)

Les critères de précision des différents modèles de biomasse utilisant la circonference à 1,30 m du sol sont illustrés dans les tableaux II et III.

L'examen de ces tableaux montre que les p-valeurs log de tous les modèles sont significatives. Ceci permet de conclure que ces

modèles ne sont pas satisfaisants et ainsi que la circonférence à 1,30 m du sol ne permet donc pas d'expliquer convenablement la biomasse ligneuse et foliaire des brins.

Ceci nous mène à considérer un autre paramètre à introduire dans les modèles, tel que la circonférence à la base du brin. L'ajustement de ces nouveaux modèles est exposé dans ce qui suit.

Modélisation de la biomasse ligneuse

Les critères de précision des différents modèles utilisant la circonférence au collet

pour la biomasse ligneuse des brins sont illustrés dans le tableau IV. L'examen de ce tableau montre que contrairement aux modèles qui utilisent la circonférence à 1,30 m, les p-valeurs de ces nouveaux modèles ne sont pas toutes significatives. Il y a lieu ainsi de conclure que la circonférence au collet des brins d'arganier permet d'expliquer convenablement leur biomasse ligneuse.

En se basant sur les AIC et BIC calculés dans le tableau IV, on remarque la pertinence du modèle I.5.

Cependant, étant donné que le coefficient « a » du dit modèle n'est pas significative-

Modèle	AIC	BIC	p-valeur	p-valeur log
I.1. Bois = a + b (C^2H) ^g	596,595	616,053	0,994	1e-05
I.2. Bois = a + b (C^2H) ^g ; a, b et g variables	318,474	384,632	0,981	0,011
I.3. Bois = a + b (C^2H) ^g ; a et b variables	312,737	363,329	0,999	0,010
I.4. Bois = a + b (C^2H) ^g ; a et g variables	313,373	363,964	0,880	0,010
I.5. Bois = a + b (C^2H) ^g ; b et g variables	314,936	365,527	0,320	0,010
I.6. Bois = a + b (C^2H) ^g ; a variable	333,708	368,733	0,744	0,007
I.7. Bois = a + b (C^2H) ^g ; b variable	368,657	403,681	0,257	0,004
I.8. Bois = a + b (C^2H) ^g ; g variable	451,302	486,327	0,999	6,6e-05
II.1. Bois = b (C^2H) ^g ; avec a = 0	597,615	613,181	0,804	0,0001
II.2. Bois = b (C^2H) ^g ; b et g variables	315,127	361,827	0,124	0,0108
II.3. Bois = b (C^2H) ^g ; b variable	368,955	400,088	0,591	0,0032
II.4. Bois = b (C^2H) ^g ; g variable	448,699	479,833	0,988	3,67e-05
III.1. Bois = a + b C^2H ; avec g = 1	597,116	612,682	0,290	1,07e-05
III.2. Bois = a + b C^2H ; a et b variables	312,152	358,852	0,533	0,012
III.3. Bois = a + b C^2H ; a variable	331,868	363,001	0,218	0,006
III.4. Bois = a + b CC^2H ; b variable	419,179	450,312	5,3e-06	0,005
IV.1. Bois = b C^2H ; avec a = 0 et g = 1	619,735	631,410	2,1e-07	0,0001
IV.2. Bois = b C^2H ; b variable	477,980	505,221	7,7e-14	1,4e-10

* p-valeur : valeur de probabilité pour le test de différence entre régression,
* p-valeur log : valeur de probabilité pour le test de différence entre régression avec transformation logarithmique des valeurs.

Modèle	AIC	BIC	p-valeur	p-valeur log
I.1. Feuille = a + b (C^2H) ^g	3757,458	3776,916	0,881	0,00014
I.2. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; a, b et g variables	3722,143	3788,301	0,974	0,0008
I.3. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; a et b variables	3713,415	3764,006	0,956	0,0008
I.4. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; a et g variables	3712,334	3762,925	0,956	0,0009
I.5. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; b et g variables	3712,007	3762,598	0,939	0,0009
I.6. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; a variable	3732,431	3767,456	0,498	0,0007
I.7. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; b variable	3759,658	3794,682	0,875	0,00017
I.8. Feuille = a + b (C^2H) ^g ; g variable	3762,29	3797,315	0,933	0,00015
II.1. Feuille = b (C^2H) ^g ; avec a = 0	3755,823	3771,390	0,929	0,00016
II.2. Feuille = b (C^2H) ^g ; b et g variables	3711,515	3758,215	0,812	0,0008
II.3. Feuille = b (C^2H) ^g ; b variable	3757,796	3788,930	0,898	0,00018
II.4. Feuille = b (C^2H) ^g ; g variable	3761,843	3792,976	0,999	0,0003
III.1. Feuille = a + b C^2H ; avec g = 1	3787,856	3803,422	1,8e-06	0,00017
III.2. Feuille = a + b C^2H ; a et b variables	3729,812	3776,512	0,002	0,00109
III.3. Feuille = a + b C^2H ; a variable	3776,659	3807,792	2,5e-08	0,0005
III.4. Feuille = a + b C^2H ; b variable	3782,973	3814,106	0,002	0,00013
IV.1. Feuille = b C^2H ; avec a = 0 et g = 1	3948,814	3960,489	0	0
IV.2. Feuille = b C^2H ; b variable	3907,217	3934,459	0	0

Tab. II :
Modèles testés
pour la biomasse du bois
utilisant C1,30.

Tab. III :
Modèles testés
pour la biomasse des
feuilles utilisant C1,30.

Modèle	AIC	BIC	p-valeur	p-valeur log
I.1. Bois = a + b (Cc^2H) ^g	275,6678	295,1260	0,3503	0,0105
I.2. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; a, b et g variables	80,7061	146,8641	0,7583	0,0774
I.3. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; a et b variables	79,82001	130,4114	0,9931	0,0698
I.4. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; a et g variables	81,50386	132,0952	0,9605	0,0669
I.5. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; b et g variables	73,1738	123,7652	0,7174	0,0768
I.6. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; a variable	95,28292	130,3077	0,7274	0,0563
I.7. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; b variable	94,44873	129,4735	0,5625	0,0628
I.8. Bois = a + b (Cc^2H) ^g ; g variable	116,6323	151,6571	0,8099	0,0498
II.1. Bois = b (Cc^2H) ^g ; avec a = 0	275,9006	291,4672	0,7659	0,0064
II.2. Bois = b (Cc^2H) ^g ; b et g variables	77,86961	124,5693	0,3931	0,0779
II.3. Bois = b (Cc^2H) ^g ; b variable	92,41307	123,5462	0,9235	0,0586
II.4. Bois = b (Cc^2H) ^g ; g variable	124,0982	155,2314	0,1576	0,0266
III.1. Bois = a + b Cc^2H ; avec g = 1	273,4718	289,0384	0,2170	0,0097
III.2. Bois = a + b Cc^2H ; a et b variables	79,64933	126,3491	0,5476	0,0591
III.3. Bois = a + b Cc^2H ; a variable	125,0007	156,1338	8,63e-11	0,0038
III.4. Bois = a + b Cc^2H ; b variable	94,8085	125,9417	0,4821	0,0803
IV.1. Bois = b Cc^2H ; avec a = 0 et g = 1	280,2918	291,9667	0,00019	3,31e-06
IV.2. Bois = b Cc^2H ; b variable	95,03289	122,2744	0,2327	0,0738

* Cc : circonférence au collet du brin

ment différent de zéro, nous proposons de considérer deux autres modèles plus simples (modèle II.3 ou modèle IV.2) qui font varier uniquement le coefficient « b » en fonction du peuplement ; le coefficient « a » étant nul. Pour ce qui est du coefficient « g », il est variable dans le modèle II.3, alors qu'il est fixé a priori à 1 dans le modèle IV.2. Un test de rapport de vraisemblance entre ces deux modèles montre que la différence est significative et permet ainsi de retenir le modèle II.3 (Cf. Tab. V).

Par ailleurs, la modélisation de la biomasse du bois en utilisant ce nouveau modèle (modèle II.3) au niveau des cinq peuplements est résumée dans le tableau VI.

L'évolution de la biomasse ligneuse en fonction de Cc^2H , des résidus du modèle ainsi que des valeurs de biomasse du bois observées en fonction des valeurs prédictes (arithmétique et logarithme) par le modèle II.3 est illustrée par la figure 2.

L'utilisation des modèles mixtes est une autre approche d'ajustement des modèles de biomasse. Le principe consiste à considérer le peuplement comme facteur aléatoire dans l'ajustement du modèle.

Ainsi, si on considère l'expression du dernier modèle retenu (modèle II.3), l'ajustement par l'approche mixte (b et g variables aléatoires) fournit les résultats consignés dans le tableau VII.

Le graphique des résidus de ce modèle en fonction de Cc^2H ainsi que les valeurs de biomasse observées en fonction des valeurs prédictes (arithmétique et logarithme) sont illustrés par la figure 3.

Tab. IV (ci-contre) :
Modèles testés utilisant C au collet pour la biomasse du bois des brins.

Tab. V (ci-dessous) :
Test du rapport de vraisemblance entre les modèles II.3 et IV.2.

Modèle	AIC	BIC	L-Ratio	P-valeur
Modèle II.3	92,41307	123,5462		
Modèle IV.2	95,03289	122,2744	4,6198	0,0316 *

(*) : significatif au risque = 0,05

Peuplement	Age (ans)	b	g
Neknafa	5	0,042403 (<0,001)	
Imgrad	10	0,043913 (<0,001)	
Tamanar_sud1	12	0,056136 (<0,001)	0,966129 (<0,001)
Iferkhess3	15	0,072838 (<0,001)	
Tissakatine	15	0,060275 (<0,001)	

Peuplement	Age (ans)	b	g	AIC	BIC	p-valeur	p-valeur log	e.f
Neknafa	5	0,0565	0,9657	109,5201	132,87	6,73e-06	9,68e-13	0,9
Imgrad	10	(<0,001)	(<0,001)					
Tamanar_sud1	12							
Iferkhess3	15							
Tissakatine	15							

Tab. VI (ci-dessus) :
Paramètres du modèle II.3 de biomasse du bois.

Tab. VII (ci-contre) :
Paramètres du modèle mixte de la biomasse du bois.

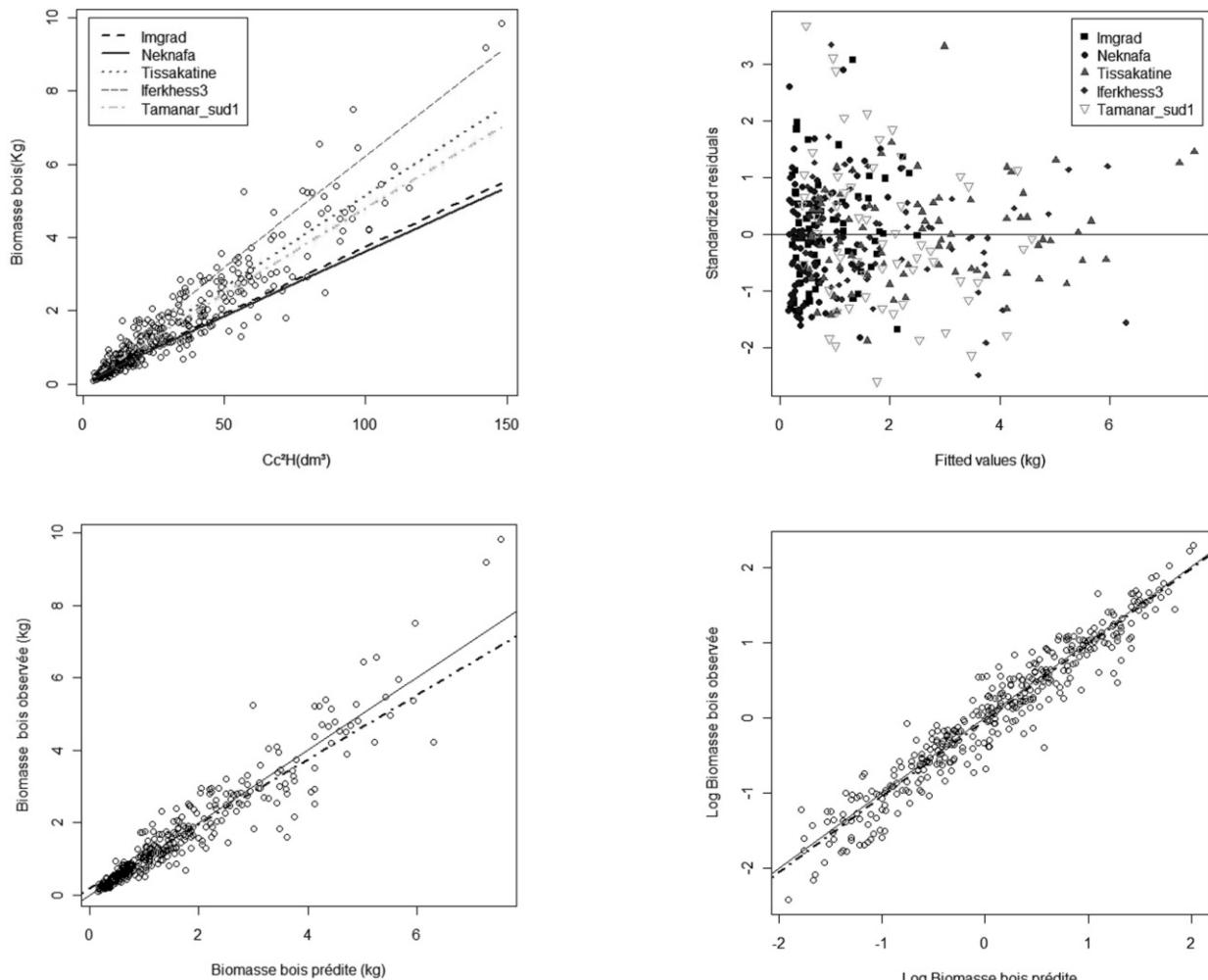


Fig. 2 (ci-dessus) :
Présentation des résidus
du modèle II.3
de biomasse du bois,
de la biomasse ligneuse
en fonction de Cc^2H et
de la biomasse observée
en fonction de celle
prédictée par le modèle
(arithmétique
et logarithme).
La droite de référence
(Y=X) est tracée
en ligne continue
sur les graphiques.

Enfin, la modélisation de la biomasse ligneuse des brins peut se faire également en adoptant une approche dirigée par laquelle on considère un modèle simple qui relie la biomasse du brin à son volume (modèle IV.2) par la formule : Biomasse = βCc^2H , β étant une expression de la masse volumique des brins ($\beta = \rho f/4\pi$).

Cette approche permet de confronter les valeurs des masses volumiques des brins estimées par le modèle (ρ estimé), aux valeurs réelles observées sur le terrain (ρ observé). La comparaison des moyennes homologues de ces deux séries de valeurs par le test de Student (Cf. Tab. VIII) montre que celles-ci ne sont pas significativement différentes.

Ainsi, il y a lieu de conclure que la considération du modèle simple (modèle IV.2) n'en-gendre pas une très grande erreur par rap-

port au modèle retenu pour la biomasse (modèle II.3) et permet donc d'estimer avec précision les masses volumiques des brins.

Modélisation de la biomasse foliaire

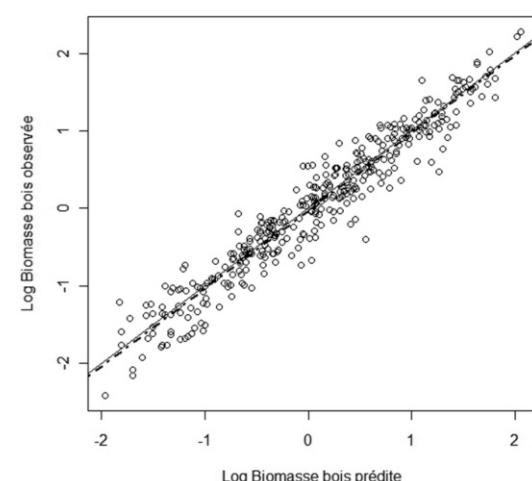
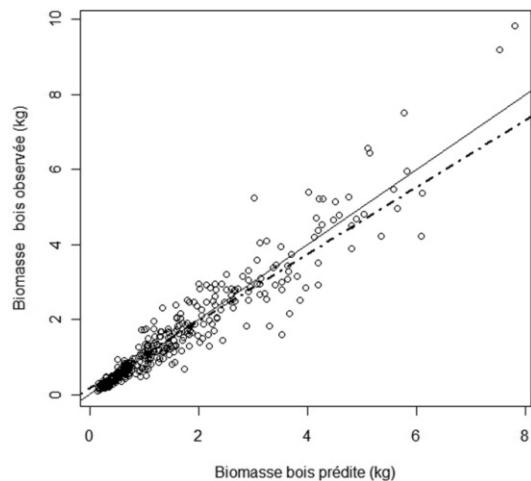
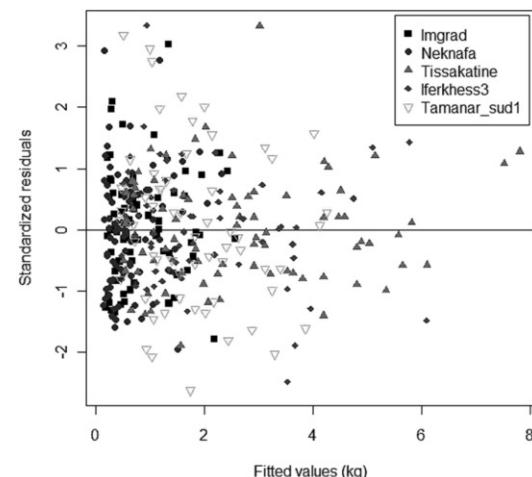
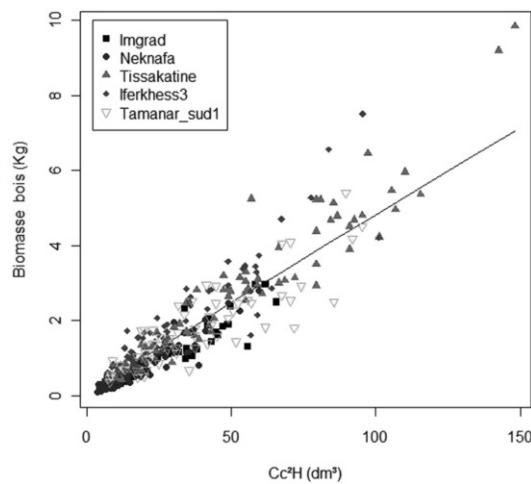
Les critères de précision des différents modèles testés pour la biomasse des feuilles des brins, utilisant la circonférence au collet, sont illustrés dans le tableau IX. D'après ce tableau, on constate que les p-valeurs log de ces modèles sont significatives et présentent donc un biais dans l'estimation de la biomasse des feuilles des brins.

L'examen des AIC et BIC fait remarquer que la circonférence au collet des brins explique mieux la variation de la biomasse foliaire que la circonférence à 1,30 m du sol.

Du fait que ces modèles simples sont biaisés, nous proposons ci-dessous une autre approche fondée sur l'étude de modèles complexes utilisant deux nouvelles variables dans le modèle de base.

Test de Student :

Différence ρ observé - ρ estimé	DF	Valeur t	Pr > t
	4	- 0,8752	0,4309 (NS)



Il s'agit du facteur d'élancement (H/C) et du rapport de la surface terrière du brin sur la surface terrière de la cépée (Gb/G).

Les résultats d'ajustement des modèles complexes impliquent ces deux nouvelles

variables sont donnés dans le tableau X.

En se basant sur les critères de précisions calculés, on peut dire que le modèle de biomasse foliaire qui apporte le plus de précision est celui qui fait intervenir les variables

Fig. 3 (ci-dessus) :
Présentation de la biomasse du bois en fonction de Cc^2H , des résidus du modèle mixte (Tab. VII) et de la biomasse observée en fonction de celle prédictée par le modèle (arithmétique et logarithme). La droite de référence ($Y=X$) est tracée en ligne continue sur les graphiques.

Modèle	AIC	BIC	p-valeur	p-valeur log
I.1. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$	3612,756	3632,214	0,8495	0,0026
I.2. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; a, b et g variables	3551,771	3617,929	0,9330	0,0094
I.3. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; a et b variables	3554,181	3604,773	0,7660	0,0073
I.4. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; a et g variables	3551,958	3602,55	0,7575	0,0077
I.5. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; b et g variables	3552,7	3603,292	0,6803	0,0074
I.6. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; a variable	3570,563	3605,587	0,4178	0,0063
I.7. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; b variable	3588,501	3623,525	0,5852	0,0047
I.8. Feuille = $a + b(Cc^2H)^g$; g variable	3598,765	3633,790	0,7789	0,0037
II.1. Feuille = $b(Cc^2H)^g$; avec $a = 0$	3615,947	3631,514	0,2239	0,0023
II.2. Feuille = $b(Cc^2H)^g$; b et g variables	3551,203	3597,903	0,5695	0,0072
II.3. Feuille = $b(Cc^2H)^g$; b variable	3591,555	3622,688	0,0389	0,0044
II.4. Feuille = $b(Cc^2H)^g$; g variable	3598,604	3629,737	0,4358	0,0034
III.1. Feuille = $a + b Cc^2H$; avec $g = 1$	3647,863	3663,429	8,44e-10	0,0024
III.2. Feuille = $a + b Cc^2H$; a et b variables	3562,878	3609,577	0,0119	0,0093
III.3. Feuille = $a + b Cc^2H$; a variable	3607,634	3638,767	6,77e-15	0,0008
III.4. Feuille = $a + b Cc^2H$; b variable	3611,564	3642,698	1,84e-07	0,0039
IV.1. Feuille = $b Cc^2H$; avec $a = 0$ et $g = 1$	3738,684	3750,359	0	0
IV.2. Feuille = $b Cc^2H$; b variable	3660,579	3687,82	0	8,77e-12

Tab. IX :
Modèles testés pour la biomasse des feuilles utilisant C au collet.

Tab. X :
Modèles complexes testés
pour la biomasse
des feuilles.

Modèle	AIC	BIC	p-valeur	e.f
1. Feuille = b (Cc^2H) ^g ; b et g variables	3551,203	3597,903	0,0072	0,66
2. Feuille = b (Cc^2H) ^g + f (Gb/G); b, g et f variables	3526,377	3592,535	0,0105	0,74
3. Feuille = b (C^2H) ^g + f (H/C); b, g et f variables	3556,703	3622,861	0,0086	0,72
4. Feuille = b (Cc^2H) ^g + f (Gb/G) + j (H/C); b, g f et j variables	3534,548	3620,164	0,0113	0,74
5. Feuille = b (Cc^2H) ^g (Gb/G)e ; b, g et e variables	3521,12	3587,278	0,0117	0,75
6. Feuille = b (Cc^2H) ^g (H/C)e ; b, g et e variables	3546,984	3613,142	0,0081	0,74

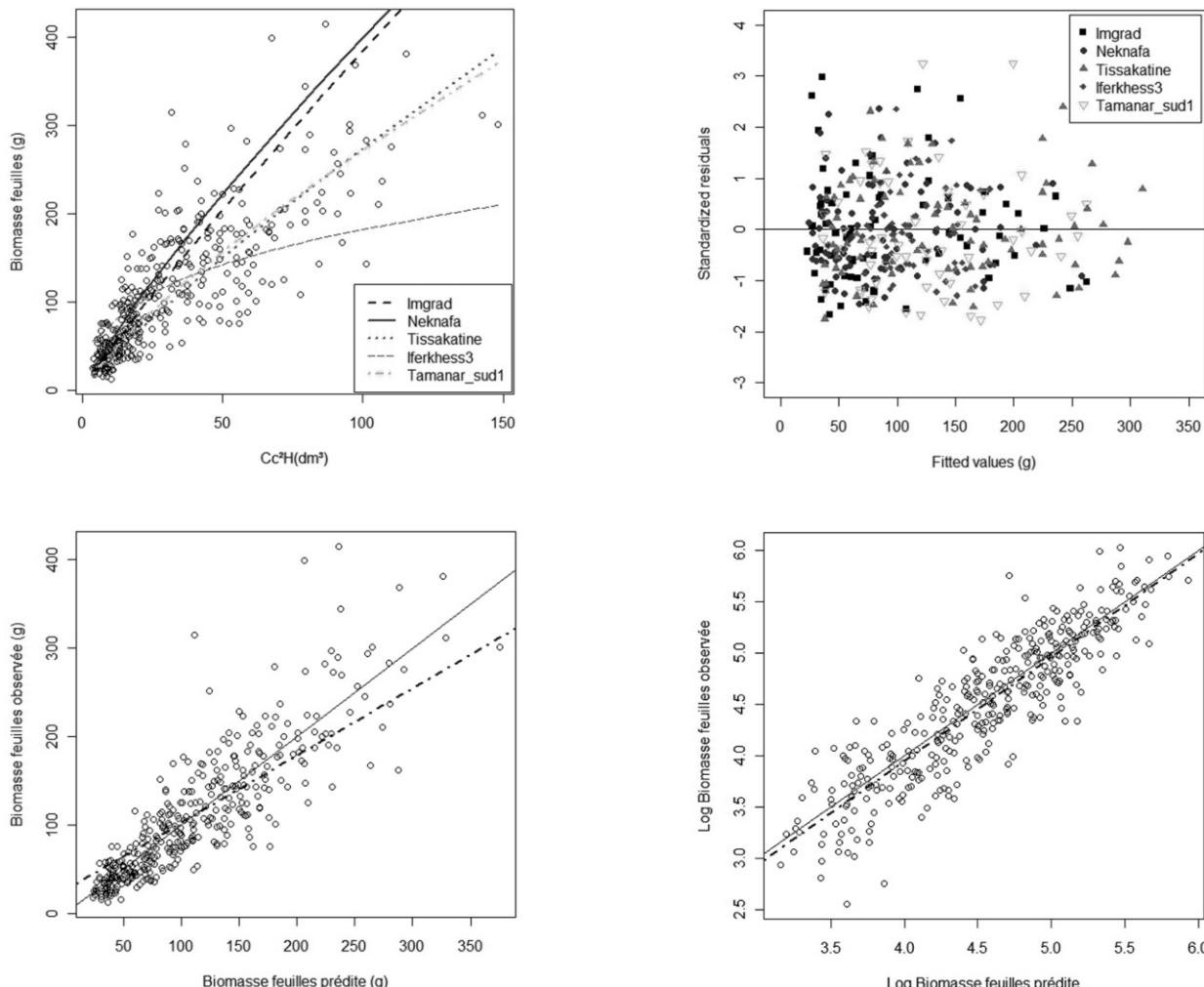
Peuplement	Age (ans)	b	g	e
Neknafa	5	16,9348 (*)	0,7438 (<0,001)	0,1302 (*)
Imgrad	10	44,2607 (*)	0,6434 (<0,001)	0,3596 (<0,001)
Tamanar_sud1	12	12,8831 (NS)	0,7249 (<0,001)	0,0976 (NS)
Iferkhess3	15	55,4608 (*)	0,3116 (<0,001)	0,0888 (NS)
Tissakatine	15	18,3511 (*)	0,7224 (<0,001)	0,1940 (**)

Tab. XI :
Paramètres du modèle
de biomasse des feuilles
retenu par peuplement.

(*) : significatif au risque = 0,05 ; (NS) : non significatif

Fig. 4 (ci-dessous) :

Présentation des résidus du modèle complexe (modèle 5), de la biomasse foliaire observée en fonction de celle prédicta par le modèle (arithmétique et logarithme) ainsi que l'évolution de la biomasse foliaire en fonction de Cc^2H . La droite de référence ($Y=X$) est tracée en ligne continue sur les graphiques.



Peuplement	Age (ans)	b	g	e	AIC	BIC	p-valeur	p-valeur log	e.f
Neknafa	5	30,3165	0,6168	0,2151	3554,772	3585,905	0,3657	0,008	0,69
Imgrad	10	(<0,001)	(<0,001)	(<0,001)					
Tamanar_sud1	12								
Iferkess3	15								
Tissakatine	15								

Tab. XII :
Paramètres du modèle mixte (modèle 5) de la biomasse foliaire.

Cc^2H et Gb/G . Le modèle qui fait intervenir toutes les variables en même temps (modèle 4) ne permet pas pour autant d'améliorer la précision et ne peut donc être retenu.

Il y a lieu de signaler aussi que le modèle faisant intervenir les deux variables Cc^2H et Gb/G en multiplicatif présente une légère supériorité en précision par rapport au modèle additif et peut donc être retenu. Sur le plan pratique, ce modèle présente également l'avantage d'être facilement linéarisable dans le cas des transformations logarithmiques.

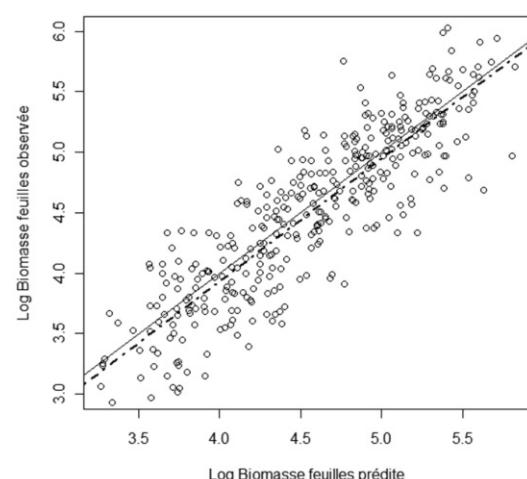
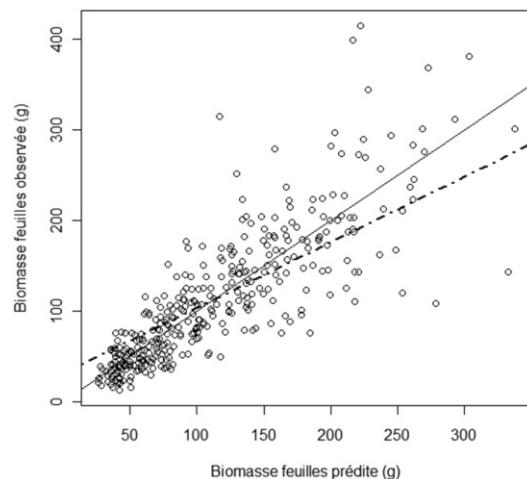
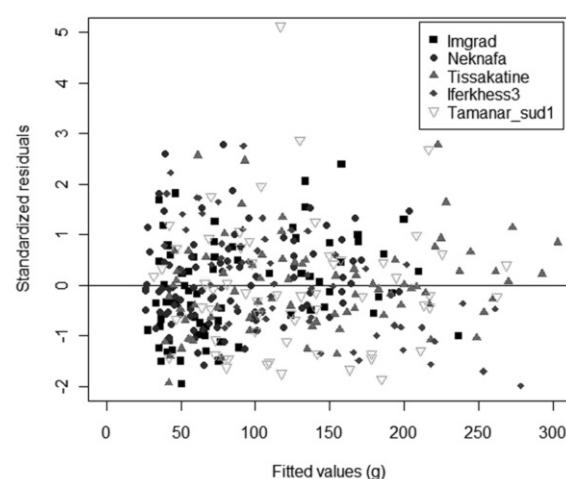
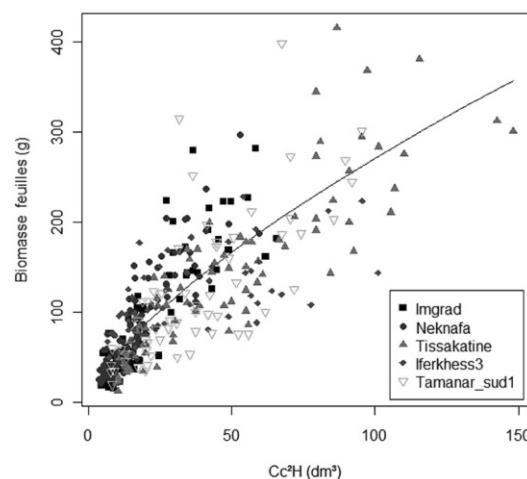
Les paramètres du modèle de la biomasse foliaire retenu sous la forme : « Biomasse feuille = $b (Cc^2H)^g (Gb/G)^e$ » au niveau des

cinq peuplements sont présentés dans le tableau XI.

La représentation graphique de l'évolution de la biomasse des feuilles en fonction de Cc^2H , des résidus du modèle complexe (modèle 5) ainsi que des valeurs de biomasse foliaire observée en fonction des valeurs prédictes (arithmétique et logarithme) est illustrée par la figure 4.

De même que pour la biomasse ligneuse, l'approche d'ajustement mixte peut être adoptée. Ainsi, si on considère l'expression du dernier modèle retenu (modèle 5), l'ajustement par l'approche mixte (b , g et e variables aléatoires) permet d'avoir les résultats consignés dans le tableau XII.

Fig. 5 (ci-dessous) :
Présentation de la biomasse foliaire en fonction de Cc^2H , des résidus du modèle mixte (modèle 5, tableau XII) et des valeurs observées en fonction de celles prédictes par le modèle (arithmétique et logarithme). La droite de référence ($Y=X$) est tracée en ligne continue sur les graphiques.



Peuplement	Age (ans)	Biomasse (tonne MS/ha)		
		Ligneuse	Foliaire	Totale
Neknafa	5	1,42	0,20	1,62
Imgrad	10	4,13	0,37	4,50
Tamanar_sud1	12	3,86	0,23	4,09
Iferkhess3	15	3,40	0,18	3,58
Tissakatine	15	9,72	0,48	10,20

Tab. XIII :
Biomasses
ligneuse et foliaire
par peuplement.

Le graphique des résidus du modèle mixte (modèle 5) ainsi que les valeurs de biomasse foliaire observées en fonction des valeurs prédites (arithmétique et logarithme) sont illustrés par la figure 5. L'examen du tableau XII montre que ce modèle mixte de biomasse foliaire présente des critères d'évaluation moins précis que ceux du modèle 5, cependant il présente l'avantage d'être valable pour d'autres peuplements de la région.

Estimation du matériel sur pied et des accroissements

L'application des tarifs retenus aux données de l'inventaire a permis d'estimer les biomasses totales sèches des peuplements à l'hectare. Le calcul des biomasses ligneuses et foliaires ainsi que leurs accroissements au niveau des cinq peuplements étudiés est consigné dans les tableaux XIII et XIV.

L'analyse du tableau XIII montre que la biomasse totale des peuplements étudiés varie de 1,62 à 10,2 tonnes de matière sèche par hectare (MS/ha) pour une densité moyenne qui varie de 75 à 118 cépées/ha. La biomasse foliaire varie de 0,18 à 0,48 tonnes MS/ha, tandis que la biomasse ligneuse est comprise entre 1,42 et 9,72 tonnes MS/ha.

Par ailleurs, la biomasse foliaire peut être traduite en terme fourragère sur la base de 0,5 unité fourragère (UF) par kilogramme de matière sèche du feuillage. Ainsi, la valeur fourragère moyenne correspondante est de l'ordre de 145,5 UF/ha.

Tab. XIV :
Accroissements moyens
en biomasses
par peuplement.

Peuplement	Age (ans)	Accroissement biomasse ligneuse (tonne MS/ha/an)	Accroissement biomasse foliaire (tonne MS/ha/an)
Neknafa	5	0,28	0,039
Imgrad	10	0,41	0,037
Tamanar_sud1	12	0,32	0,019
Iferkhess3	15	0,23	0,012
Tissakatine	15	0,65	0,032

Pour ce qui est de la biomasse ligneuse, la production énergétique au niveau de ces peuplements peut être évaluée à 126 000 MégaJoule/ha (30,1 millions kcal/ha), sur la base d'un kilogramme de bois sec équivalent à 28 MégaJoule (PYLE, 1979). Cette production correspond à 4,3 tonnes équivalent de charbon par hectare ou encore à 21,5 barils d'équivalent pétrole par hectare. Ce potentiel énergétique renouvelable est tout de même considérable dans une région semi-aride du Maroc (M'HIRIT *et al.*, 1998).

Discussion

Les équations obtenues sont des relations allométriques qui traduisent la biomasse en fonction de la circonférence et la hauteur du brin. L'ajustement du modèle non linéaire en C^2H sous sa forme générale : « $a + b (C^2H)^g$ » a permis de modéliser les biomasses ligneuse et foliaire des brins d'arganier avec une bonne précision. En fonction de la valeur des paramètres a , b et g , différents modèles ont été estimés.

La comparaison de ces différents modèles a mis en évidence la supériorité de ceux qui utilisent la circonférence au collet des brins. Ces résultats concordent avec ceux rapportés dans la littérature. En effet, BAKKALI *et al.* (2002) ont montré que le diamètre à la souche explique convenablement la biomasse ligneuse et foliaire des brins du cytise de Battandier au niveau du Moyen Atlas central marocain.

Concernant les arbustes fourragers, BROWN (1997) précise que le diamètre basal est une bonne variable explicative de production. Dans le cas de l'*Acacia cyanophylla*, LAAMOURI *et al.* (2002) estiment que la seule connaissance du diamètre basal suffit pour établir un modèle linéaire significatif prédictif de la production en biomasse de cette essence.

Dans une autre étude concernant l'évaluation de la biomasse d'*Acacia senegal* dans une savane sahélienne au Sénégal, Poupon (1976) a montré que la biomasse totale de l'arbre ou l'une quelconque de ses composantes peut être estimée à partir de la seule connaissance de la circonférence mesurée à la base du tronc.

Finalement, MOKRIM (1983) a montré que la circonférence à la base du tronc est le meilleur estimateur de la biomasse ligneuse du chêne vert dans la région d'Ounein (Haut Atlas marocain).

Par ailleurs, l'utilisation de la modélisation mixte dans l'ajustement de la biomasse ligneuse permet d'avoir un modèle qui explique légèrement mieux cette variation (l'efficience du modèle mixte est égale à 0,9 au lieu de 0,89 pour les autres modèles), tout en présentant des critères de précision nettement meilleurs.

Sur le plan pratique, cette démarche de modélisation mixte de la biomasse du bois, permet de considérer un modèle plus simple à utiliser du fait qu'il utilise moins de variables et ne nécessite pas la connaissance de l'âge du peuplement. Ceci rend le modèle valable pour une gamme d'âges plus large des jeunes taillis d'arganier de la région.

Une autre approche de modélisation de la biomasse ligneuse a permis d'estimer les masses volumiques des brins échantillonnes qui ont été confrontées aux valeurs mesurées. Le modèle de référence ($g=1$) permet d'interpréter le coefficient « b » comme étant une expression de la masse volumique ($\rho^* f/4\pi$). Ce modèle est très proche du meilleur modèle obtenu sur la base de critères statistiques, le coefficient « g » de ce dernier étant égal à 0,96.

La différence entre ces valeurs s'est avérée non significative et permet ainsi de conclure que le modèle de biomasse ajusté est bien adapté à nos données.

Pour ce qui est de la biomasse des feuilles, elle est en partie expliquée par le volume du brin représenté par le facteur (Cc^2H) dans le modèle simple. L'autre partie de l'information a été expliquée par un indice de densité ou de compétition entre les brins de la cépée. En effet, l'utilisation du facteur d'élancement (H/C) ou du rapport de la surface terrière du brin sur la somme des surfaces terrières de tous les brins de la souche (Gb/G) permet d'améliorer la précision du modèle. On note également une légère supériorité du modèle faisant intervenir le rapport (Gb/G).

Les données bibliographiques évoquant la biomasse des formations arborescentes des milieux semi-arides sont peu nombreuses (MONTÈS, 1999). Le manque de données sur la biomasse des arganeraies n'a permis que des comparaisons limitées. En effet, les seules données disponibles pour l'arganier sont celles de BENZYANE et KHATOURI (1991) et d'OUADAHA (2007). Les premiers auteurs avancent une production de 52 tonnes MS/ha dans des peuplements de densité moyenne de 297 pieds/ha. Quant au second, il estime une production moyenne de 4,7 tonnes

MS/ha pour des jeunes taillis de densité moyenne de 51 cépées/ha.

Si l'on s'intéresse dans un premier temps à l'étude menée par les premiers auteurs dans la région de Tamanar (Plateau des Haha), on peut noter que ces peuplements sont des futaies adultes beaucoup plus denses que les taillis que nous avons étudiés (le nombre d'arbres par hectare y est trois fois plus important). Ceci pourrait donc expliquer cette biomasse très élevée. Quant à la deuxième étude, les estimations données pour des jeunes taillis de moins de 10 ans dans la région de Tamanar sont très proches des nôtres.

Enfin, il y a lieu de signaler que deux études récentes se sont intéressées à l'évaluation de la phytomasse foliaire de peuplements adultes d'arganier dans cette même région (MAROUCH, 2013 et AAMMOU, 2013). Ces auteurs ont avancé des valeurs qui varient entre 1,17 et 1,25 tonnes MS/ha pour des peuplements de densité moyenne respective de 86 et 71 pieds/ha.

Par ailleurs, la différence de biomasses entre les cinq peuplements étudiés s'explique tout d'abord par une différence d'âges. Une évolution progressive de cette production, du plus jeune peuplement au plus âgé, confirme ce point. La densité en nombre de souches à l'hectare qui varie d'un peuplement à l'autre permet également d'expliquer cette différence. Ces deux variables illustrent l'effet du peuplement sur cette production.

Enfin, l'influence des caractéristiques du site doit être également signalée. En effet, le calcul des biomasses au niveau des peuplements étudiés montre une différence pour les peuplements d'Iferkhess3 et de Tissakatine qui ont le même âge. Cette production est plus importante à Tissakatine alors même que la densité est moins élevée au niveau de ce peuplement. Ceci peut être lié aux vitesses de croissance en circonférence et en hauteur qui peuvent être attribuées à l'effet « station ». En effet, l'analyse des potentialités des milieux a montré que le peuplement d'Iferkhess3 fait partie d'un groupement écologique moins favorable que celui du peuplement de Tissakatine (BELGHAZI, 2013). Cette dernière localité jouit de conditions écologiques relativement plus favorables pour le développement de l'arganier : les sols sont généralement argileux, doués donc d'une bonne réserve hydrique et des précipitations relativement plus abondantes.

Ces valeurs de biomasse peuvent être comparées également à celles d'autres espèces

qui caractérisent les milieux arides ou semi-arides de la région. Ainsi, REGRAGUI (1999) avance une biomasse moyenne de 6,99 tonnes MS/ha dans un taillis de chêne vert âgé de 21 ans au Maroc oriental.

Pour ce qui est du thuya (*Tetraclinis articulata*), HALOUI (1992) a annoncé une biomasse moyenne de 13,1 tonnes MS/ha dans des peuplements à l'est du Maroc. Le genévrier rouge (*Juniperus phoenicea*), essence également présente dans la région d'Essaouira, atteint en moyenne une biomasse totale de 10,1 tonnes MS/ha dans la forêt de l'Ouneïn au niveau du Haut Atlas (MOKRIM, 1983). Cette même espèce présente une biomasse sur pied de 29,5 tonnes MS/ha dans l'île de Naxos en Grèce (TSIOURLIS, 1992).

Finalement, il y a lieu de citer également le travail d'ABDELKEBIR *et al.* (2004) sur l'*Acacia saligna* dans des plantations sylvo-pastorales en Tunisie présaharienne. Les auteurs estiment une biomasse totale qui varie de 1,7 à 16,4 tonnes MS/ha.

Pour conclure, les équations développées dans cette étude permettent de répondre à diverses exigences des utilisateurs des produits de l'arganier, qu'il s'agisse de la demande en termes de bois ou de feuillage.

Enfin, il convient de dire qu'en matière d'aménagement des ressources forestières, ces équations peuvent servir dans la construction des tarifs peuplement nécessaires pour l'élaboration d'un modèle de production.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, des fonctions allométriques ont été développées pour estimer la biomasse ligneuse et foliaire des peuplements d'arganier en utilisant la circonférence et la hauteur comme entrées des tarifs. La simplicité de ces équations pourrait faciliter une utilisation plus répandue par les gestionnaires forestiers locaux.

L'étude a montré que les paramètres classiques de l'estimation de la biomasse telle que la circonférence à 1,30 m du sol n'est pas explicative dans le cas de l'arganier. Ainsi, des modèles utilisant la circonférence à la base du brin sont plus pertinentes. Ces modèles sont d'un grand intérêt pour les gestionnaires de l'arganeraie qui s'appuient très souvent sur l'estimation de leurs coupes au jugé.

Néanmoins, ces modèles ne sont rigoureusement valables que pour les peuplements où l'échantillonnage a eu lieu. Dans le but de les généraliser à l'ensemble du territoire de l'arganeraie, il semble judicieux de réfléchir aux conditions de leur extrapolation. Les modèles de type puissance restent généralement extrapolables avec une bonne fiabilité en dehors de leur domaine de validité (ZIANIS et MENCUCCINI, 2004).

Finalement, le jeu de tarifs proposé dans cette étude permettra également d'élaborer des scénarios de récolte de bois avec des intensités différentes en fonction de la demande des populations. Ces scénarios permettront une adéquation des prélevements à la capacité de production du capital sur pied afin de ne pas compromettre les possibilités de récoltes dans le futur.

En outre, les équations développées constituent un outil essentiel pour évaluer la teneur en éléments nutritifs des arbres et mesurer les stocks de carbone forestier au niveau de ces peuplements.

Références bibliographiques

- Aamrou K., 2013. Estimation de la phytomasse foliaire des futaies adultes de l'arganier et sa valeur fourragère dans le versant sud d'Amsitten (Commune Rurale d'Imgrad). Mémoire de 3e cycle, ENFI, Salé, Maroc, 98 p.
- Abdelkebir T., Belghazi B., Ezzahiri M. et Ferchichi A., 2004. Elaboration de tarifs biomasse et évaluation de la production fourragère et ligneuse d'*Acacia saligna* en Tunisie aride. Cahiers Options Méditerranéennes, C.I.H.E.A.M., Zaragoza, n° 62, 331-335 pp.
- Adu-Bredou S., Foua Tape Bi A., Bouillet J.P., KouaméMé M., Yamoah Kyei S. et Saint-André L., 2008. An explicit stem profile model for forked and un-forked Teak (*Tectona grandis*) trees in West Africa. For. Ecol. Manage. 255, 2189-2203 pp.
- Akaike H., 1974. A new look at statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control AU-19 : 716-722 pp.
- Bakkali M., Barbero M., Qarro M., El Abidine A.Z., Ouijja A., Ezzahiri M., Belghazi B. et Diouri M., 2002. Above-ground biomass of *Argyrocytisus battandieri* in the range lands of the Moroccan tabular Middle Atlas. Prediction and effect of the grazing pressure. Ecologia Mediterranea, V. 28 (1), 19-30 pp.
- Belghazi T., 2013. Typologie de l'arganeraie et estimation de la biomasse aérienne des taillis d'arganier (Plateau des Haha-Essaouira, Maroc). Thèse de Doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université Catholique de Louvain, Belgique, 265 p.

- Benchekroun F. et Buttoud G., 1989. L'arganeraie dans l'économie rurale du Sud-ouest marocain. Rev. Forêt méditerranéenne, t. XI, n° : 2, 127-136 pp.
- Boysen-Jensen P. et Müller D., 1927. Undersøgelser over stofproduktionen i yngre beovoksninger af ask og bøg. Der forstlige forsgsvæsen 9, 221-268 pp.
- Brown S., 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In: Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Arboles, Vol. 1, Antalya, Turquia, 13-22 October 1997.
- Cabanettes A. et Rapp M., 1978. Biomasse, minéralomasse et productivité d'un écosystème à pins pignons (*Pinus pinea*) du littoral méditerranéen : I – Biomasse. Oecol. Plant., vol. 13, n° 3, 271-286 pp.
- Cairns M. A., Haggerty P. K., Alvarez R., De Jong B. H. J. et Olmsted I., 2000. Tropical Mexico's recent land use change: A region's contribution to the global carbon cycle. Ecological application (10), 5, 1426-1441 pp.
- Canadell J. G. et Raupach M. R., 2008. Managing forests for climate change mitigation. Science 320, 1456-1457 pp.
- Carvalho J. P. et Parresol B. R., 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd). Forest Ecology and Management, 179, 269-276 pp.
- Emberger L., 1938. Les arbres du Maroc et comment les reconnaître, Larose, Paris, 318 p.
- Emberger L., 1939. Aperçu général sur la végétation du Maroc. Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc au 1/500000, Veröff. Geobot. Inst. Rübel in Zürich (14) et Mém. h.s. Soc. Sc. Nat. Maroc, 40-157 pp, ISC, Rabat.
- Emberger L., 1955. Classification biogéographique des climats. Rev. Trav. Lab. Bot. Zoo. Fac. Sci., Montpellier Sér. Bot., 7, 3-43 pp.
- Essaghi S., 2012. Typologie et caractéristiques physico-chimiques des sols sur la base des différents substrats géologiques, relief et couvert végétal dans la région d'Amsitten. Mémoire de 3e cycle, ENFI, Salé, Maroc, 155 p.
- Frandsen W. H., 1983. Modelling big sagebrush as a fuel. Journal of Range Management 36, 596-600 pp.
- Haloui B., 1992. Phytomasse, minéralomasse et productivité des principaux écosystèmes forestiers du Maroc oriental. Actes des Premières Journées de l'Arbre, Fac. Sci. Semlalia,: 91-93 pp.
- I.F.N., 1999. Inventaire Forestier National marocain. Rapport de synthèse, Direction de développement forestier, Rabat, 45 p.
- Jalkanen A., Makipaa R., Stahl G., Lehtonen A. Petersson H., 2005. Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors. Ann. For. Sci., 62: 845-851 pp.
- Laamouri A., Chtourou A. et Ben Salem H. 2002. Prédiction de la biomasse aérienne d'*Acacia cyanophylla* Lindl. (Syn. *A. saligna* (Labill.) H. Wendl) à partir de mensurations dimensionnelles. Ann. For. Sci. 59, 335-340 pp.
- Le Quere C., Raupach M. R., Canadell J. G. et Marland G., 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geoscience 2, 831-836 pp.
- Lewis S. L., Lopez-Gonzalez G., Sonke B., Affum-Baffoe K., Baker T. R., Ojo L. O., Phillips O. L., Reitsma J. M., White L., Comiskey J. A., Djuikouo M. N., Ewango C. E. N., Feldpausch T. R., Hamilton A. C., Gloor M., Hart T., Hladik A., Lloyd J., Lovett J. C., Makana J. R., Malhi Y., Mbago F. M., Ndangalasi H. J., Peacock J., Peh K. S. H., Sheil D., Sunderland T., Swaine M. D., Taplin J., Taylor D., Thomas S. C., Votere R., Woll H., 2009. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. Nature 457, 1003-1007 pp.
- Marouch R., 2013. Evaluation de la phytomasse foliaire et de la qualité fourragère des futaies adultes d'arganier pur, des forêts au sein des 3 communes rurales du versant nord de Jbel Amsitten : Smimou, Imin tlit et Ida ou azza. Mémoire de 3e cycle, ENFI, Salé, Maroc, 124 p.
- Mayer D. G. et Butler D. G., 1993. Statistical validation. Ecological Modelling, 68, 21-32 pp.
- Mayer D. G., Stuart M. A. et Swain A. J., 1994. Regression of real world data on model output: an appropriate overall test of validity. Agricultural Systems 45, 93-104 pp.
- M'hirit O., Benzyane M., Benchekroun F., El Yousfi S.M. et Bendaânoun M., 1998. L'arganier : une espèce fruitière-forestière à usage multiple. MARDAGA, 145p.
- Miglioretti F., 1983. Phytoécologie des peuplements à *Quercus ilex* et *Quercus pubescens* en Gardiole de Rians (Var). Approche méthodologique pour évaluer la phytomasse des taillis de chêne vert. Thèse de doctorat, Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, 72 p.
- Mokrim A., 1983. Etude de la biomasse (foliaire et ligneuse) du chêne vert et genévrier rouge dans l'Ounein et mise en évidence des relations en vue d'une estimation indirecte de cette biomasse. Mémoire de fin d'étude, IAV Hassan II, 90 p.
- Montès N., 1999. Potentialités, dynamique et gestion d'une formation arborée à genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) des Atlas marocains: Le cas de la vallée de l'Azzaden. Thèse de l'Université Toulouse Le Mirail, 203 p.
- Murray R. B. et Jacobson M. Q., 1982. An evaluation of dimension analysis for predicting shrub biomass. Journal of Range Management 35, 451-454 pp.
- Muukkonen P., 2007. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. European Journal of Forest Research, 126, 157-166 pp.
- Nabuurs G. J., Schelhaas M. J., Mohren G. M. J. et Field C. B., 2003. Temporal evolution of the european forest sector carbon sink from 1950 to 1999. Global change biology, 9: 152-160 pp.
- Navar J., Najera J. et Jurado E., 2002. Biomass estimation equations in the Tamaulipan thornscrub of north-eastern Mexico. Journal of Arid Environments 52, 167-179 pp.
- Navar J., Gonzalez N., Maldonado D., Graciano J., Dale V. et Parresol B., 2003. Biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico, Agrociencia, in review.
- Oudaha Y., 2007. Estimation de la biomasse des jeunes rejets d'arganier dans le plateau des Haha (Province d'Essaouira). Mémoire de 3e cycle, ENFI, Salé, Maroc, 69 p.
- Poupon H., 1976. La biomasse et l'évolution de sa répartition au cours de la croissance d'*Acacia senegal* dans une savane sahélienne (Sénégal). Revue bois et forêts des tropiques, n° 166, mars-avril 1976, 23-38 pp.

- Pyle D. L., 1979. Biomass as a Fuel Source in Developing Countries. I.T.D. Conference, Reading University.
- R Development Core Team, 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Regragui A., 1999. Prédiction de la phytomasse aérienne des taillis de chêne vert du massif forestier d'El Ayat (Maroc Oriental). Actes Inst. Agro. Vet. Hassan II (Maroc), Vol. 19 (4) : 211-217 pp.
- Schwarz G., 1978. Estimating the dimension of a model. Annals of Statistics 6: 461-464 pp.
- Shaiel O., Loustau D., Garchi S., Bachetobji B. et El Aouini M. H., 2010. Estimation allométrique de la biomasse du pin maritime en dune littorale : cas de la forêt de Rimel (Tunisie). Revue Forêt méditerranéenne, XXXI, n° 3, 231-241 pp.
- Traoré C. O. K., 1993. Contribution à la cartographie et à l'étude des types de peuplements et des communautés végétales de la tétraclinaie d'Ichach à Essaouira dans un but d'aménagement. Mémoire de 3e cycle E.N.F.I., 84 p.
- Tsiourlis G. M., 1992. Etude d'un écosystème de maquis à *Juniperus phoenicea* L. (Naxos, Cyclades, Grèce): phytomasse et nécromasse épigées. Bulletin Ecologique, 23 (1-2): 59-69 pp.
- Waring R. H. et Running S. W., 1998. Forest ecosystems: analysis at multiple scales. Ed. 2. Academic Press, San Diego, CA. 370 p.
- Whittaker R. H. et Woodwell G. M., 1968. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest. New York, Journal of Ecology, 56, 1-25 pp.
- Woods K. D., Feiveson A. H. et Botkin D. B., 1991. Statistical analysis for biomass density and leaf-area index estimation. Canadian Journal of Forest Research 21, 974-989 pp.
- Wutzler T., Wirth C. et Schumacher J., 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica*) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. Canadian Journal of Forest Research 38, 1661-1675 pp.
- Xing Z.S., Bourque C. P. A., Swift D. E., Clowater C. W. et Krasowski Meng F. R., 2005. Carbon and biomass partitioning in balsam fir (*Abies balsamea*), Tree physiology, 25, 1207-1217 pp.
- Zewdie M., Olsson M. et Verwijst T., 2009. Above-ground biomass production and allometric relations of *Eucalyptus globulus* coppice plantations along a chronosequence in the central highlands of Ethiopia. Biomass and bioenergy 33, 421-428 pp.
- Zianis D. et Mencuccini M., 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. Forest Ecology and Management, 187(2-3): 311-332 pp.

Résumé

Dans un contexte semi-aride à aride, soumis à de fortes pressions climatiques et anthropiques, l'arganeraie marocaine procure des biens et services indispensables aux populations locales. L'objectif principal de cette étude est de quantifier l'offre potentielle en biomasse ligneuse et foliaire de l'arganeraie des Haha, qui occupe 131 000 ha dans la région d'Essaouira.

Ainsi, des équations allométriques ont été ajustées dans des jeunes taillis d'arganier de la région. L'échantillonnage a porté sur 369 brins de 123 cépées issues de 5 taillis (5-15 ans). A l'échelle du brin, un modèle allométrique à 2 entrées (circonférence et hauteur), a permis d'obtenir les meilleurs ajustements ; pour la biomasse foliaire, les ajustements ont été améliorés en prenant en compte la compétition entre brins d'une cépée.

Les résultats obtenus montrent que la production moyenne en biomasse totale des peuplements étudiés a été estimée à environ 4,8 tonnes MS/ha pour une densité moyenne de 95 cépées/ha. La production foliaire moyenne est de 292 kg MS/ha, ce qui correspond à une valeur fourragère moyenne de l'ordre de 146 UF/ha sur base de 0,5 unité fourragère (UF) par kilogramme de matière sèche du feuillage.

Summary

Biomass from wood and foliage from argan coppicing on the Haha plateau (Morocco)

Growing in a semi-arid to arid context and subject to great pressure from both the climate and human activity, the argan stands in Morocco provide goods and services that are absolutely vital to the local population. The main aim of this study has been to quantify the potential biomass from wood and foliage available from the argan stands in the Essaouira region which cover 131,000 hectares on the Haha plateau.

Thus, the allometric equations were modified for the region's young argan coppicing. The samples were made up of 369 twigs from 123 stools from 5 coppices (5-15 years). At the level of the twig, an allometric model with 2 values (circumference and height) gave the best adjustments: for the leafy biomass, the adjustments were improved by taking into account the competition between twigs on the same stool.

The results obtained show that the average production of total biomass in the stands under study is estimated as being some 4.8 tonnes MS/ha for an average density of 95 stools/ha. The average leaf production is 292 kg MS/ha, which corresponds to an average nutrient value in the order of 146 NU/ha on the basis of 0.5 nutrient units (NU) per kilogramme of dry foliage.