
Soumis le : 05/10/2014

Forme révisée acceptée le : 27/10/2016

Auteur correspondant : boulmanem@yahoo.fr

Nature & Technology

Eucalyptus camaldulensis et fertilité des sols dans la plaine de Sidi Yahya-Gharb (Nord ouest du Maroc)

Mohamed BOULMANE^a, Abderrahim KHIA^b et Hassan ABBASI^c

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

^b Laboratoire de Biotechnologie, Environnement et Qualité – Faculté des Sciences Université Ibn Tofail, B.P. 133 Kénitra, 14 000 Maroc

^c Direction de la lutte contre la désertification et de la protection de la nature, N°3 – Rue Haroun Rachid, Agdal-Rabat

Abstract

Plantations of *Eucalyptus camaldulensis* of Sidi Yahya-Gharb region produce large amounts of biomass in very poor sandy soil nutrients. The nutrients stocks were quantified in different compartments (biomass, litter and soil) of a copse of *Eucalyptus camdulensis* at the end of the second rotation. The total aerial biomass (standing + infringement) is about 48 tMS.ha⁻¹ and whose wooden trunks constitute 76% of it. This corresponds to an average productivity of 4.4 tMS.ha⁻¹yr⁻¹. The use of biomass on foot exports 89% of the dry aboveground biomass. The soil return per litter is 1.7 tDM / ha / year, whose leaves account for more than 72%. Mineralomass calculating of the total aboveground biomass shows the preponderance of calcium (51%). The elements phosphorus and magnesium are present in an amount less. The leaves are rich in N and K and the bark is rich in Ca. The studied soils have a very good fertility for magnesium and stocks are very low for phosphorus and calcium. Debarking provide an answer to the calcium deficit but not significant for phosphorus.

Keywords: Eucalyptus camdulensis, mineralomass, fertility and stock

Résumé

Les plantations d'*Eucalyptus camaldulensis* de plaine de Sidi Yahya-Gharb produisent de quantités importantes de biomasse dans des sols sableux très pauvres en éléments nutritifs. Les stocks d'éléments nutritifs ont été quantifiés dans les différents compartiments (biomasse, litière et sols) d'un taillis d'*Eucalyptus camaldulensis* à la fin de la 2^{ème} rotation. La biomasse aérienne totale (sur pieds + délit) est de l'ordre de 48 tMS.ha⁻¹ dont le bois du tronc constitue plus de 76%. Ce qui correspond à une productivité moyenne de l'ordre de 4,4 tMS/ha/an. L'exploitation de la biomasse sur pieds exporte 89% de la biomasse aérienne sèche. La restitution au sol sous forme de litière est de 1,7 tMS.ha⁻¹an⁻¹ dont les feuilles constituent plus de 72%. Le calcul de la minéralomasse de la biomasse aérienne totale montre la prépondérance du calcium (51%). Les éléments les moins présents en quantité sont le phosphore et le magnésium. Les feuilles sont particulièrement riches en N et K et l'écorce est très riche en Ca. Les sols étudiés présentent une très bonne fertilité pour le magnésium et les stocks sont très faibles pour le phosphore et le calcium. L'écorçage apporterait une réponse au déficit pour le calcium mais peu significative pour le phosphore.

Mots-clés : Eucalyptus camaldulensis, minéralomasse, fertilité, exportation, stock

1. Introduction

L'accroissement de la population mondiale allié à l'évolution des niveaux de vie entraîne une demande croissante de bois et des produits dérivés ce qui entraîne une pression continue sur les forêts. Cela tend de plus en plus à substituer à l'utilisation des forêts naturelles souvent complexes, la culture intensive d'essences d'eucalyptus susceptibles de produire un fort volume de bois par unité de surface [1]. L'eucalyptus est l'une des

principales espèces forestières plantées dans le monde. Sa forte croissance et sa rusticité permettant d'établir rapidement une ressource et de répondre à des besoins divers, industriels (bois et trituration) ou domestiques (bois de chauffage, poteau,...). D'après la FAO, il y aurait actuellement environ 19 millions d'hectare plantés dans plus de 37 pays [2]. Le développement rapide et important de l'eucalyptus dans le monde a suscité des controverses sur l'impact de ces plantations sur leur milieu. Aujourd'hui, les grandes plantations d'eucalyptus

(plusieurs milliers d'hectare) réalisées dans des pays comme le Brésil ou la péninsule ibérique véhiculent une image négative.

Les taillis à courte rotation (TCR) représentent une méthode efficace pour produire rapidement de biomasse lignocellulosique. L'eucalyptus est l'arbre le plus utilisé en reboisement en Afrique du Nord, grâce à sa plasticité écologique et à la rapidité de sa croissance. Depuis son introduction au Maroc au début du 20^{ème} siècle, cet arbre joue un rôle important dans la politique marocaine. Au Maroc, Les plantations d'eucalyptus occupent actuellement une superficie totale de plus de 209 000 ha, soit environ 38% de la superficie totale des reboisements. Les produits ligneux fournis par les eucalyptus sont très diversifiés et répondent aux nombreux besoins exprimés par l'économie nationale. En effet, l'eucalyptus répond bien aux cahiers de charges des industriels, que ce soit pour la fabrication des panneaux de particules, des poteaux, de la pâte à papier,.... Les rondins d'eucalyptus sont également utilisés dans le soutènement des mines de charbon en complément des poteaux de résineux importés. Il en est de même en agriculture, où les perches et les piquets constituent l'essentiel de l'ossature des serres et des tuteurs.

La principale espèce utilisée dans la production de la pâte à papier est *Eucalyptus camaldulensis*, qui donne un rendement papetier de 44%. Actuellement, plus de 100 000 ha sont destinés à l'approvisionnement de l'usine de cellulose de Sidi Yahia (Plaine de Kénitra), dont la capacité de production est d'environ 100 000 tonnes de pâte blanchie par an. Les périodes de révolution des peuplements forestiers sont bien souvent déterminées en fonction de critères d'économie et de productivité de matière ligneuse à plus ou moins court terme [3-6]. Dans un tel cadre d'aménagement, raccourcir la durée de révolution des peuplements, par exemple, se trouve justifié. Cependant, le nouveau cadre d'aménagement basé sur la préservation du caractère durable des forêts oblige à satisfaire les impératifs qui sont liés, comme celui de maintenir à long terme la fertilité des sols, l'un des facteurs clé de la productivité des peuplements.

Dans ce nouveau mode d'aménagement, la productivité des peuplements (et par conséquent leur rentabilité) se trouve déterminée en fonction de tous les facteurs qui l'influencent y compris la période de révolution. Un des facteurs déterminants sur la productivité des stations qui a été beaucoup étudié est la récolte par arbre entier. Les références ont montré qu'il s'agit d'un mode de récolte

qui contribue substantiellement à l'exportation d'éléments nutritifs et donc à la perte de fertilité des sols. La présente étude a pour objectif d'établir le bilan de biomasse et de minéralomasse d'un taillis d'*Eucalyptus camaldulensis* en fin de la 2^{ème} rotation. Ce bilan permettra de connaître à la fois l'impact de l'exportation liée à l'exploitation et d'évaluer les besoins potentiels de fertilisation.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation du site d'étude

Trois placettes d'un hectare chacune ont été choisies dans la parcelle d'environ 34 ha de taillis d'*Eucalyptus camaldulensis* se trouvant près de Sidi Yahya-Gharb à côté de la route amenant de Kénitra à Sidi Slimane à la fin de sa deuxième rotation (Figure 1). La parcelle a été plantée en *Eucalyptus camaldulensis* avec une densité de 1000 tiges.ha⁻¹ en 1980 et elle a subi deux exploitations (1990 et 2001). La parcelle est proposée pour sa troisième exploitation (fin de la 2^{ème} rotation du taillis) dans le marché de 2012.

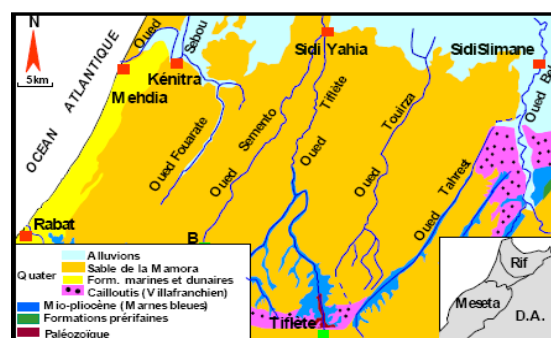


Figure 1 : Carte de situation de la zone d'étude.

2.2. Méthodologie générale

Le premier objectif de cette étude est la quantification de la biomasse d'une plantation de taillis d'*eucalyptus camaldulensis* (2^{ème} rotation) en considérant les différents compartiments constitutifs de la biomasse aérienne d'un arbre (bois du tronc, branches, rameaux, écorce du tronc, feuilles et branches mortes). Lors de l'exploitation, le bois dont la circonférence est supérieure à 7 cm est exporté hors de la parcelle. La quantification de la biomasse souterraine (souches et racines) n'est considérée dans cette étude qu'à travers une approche bibliographique.

Le deuxième objectif est de déterminer la minéralomasse (quantité des éléments nutritifs majeurs N, P, K, Ca et Mg dans la biomasse) et de la comparer au stock de ces

éléments contenus dans le sol et à la quantité d'éléments retournant au sol à travers les chûtes de litière.

Afin d'évaluer la durabilité du système, nous calculerons le prélèvement qui s'apparente au besoin annuel de la plantation qui est défini comme la somme de l'immobilisation (minéralomasse des parties ligneuses) et de la restitution (litière et récréation – éléments solubilisés par les pluies [7]).

2.3. Mesures effectuées sur le terrain

La méthodologie appliquée pour l'estimation de la biomasse et la minéralomasse dans les écosystèmes forestiers a déjà été largement éprouvée dans différents peuplements [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Les principales mesures effectuées sur le terrain sont :

A. Inventaire et structure du peuplement :

Un inventaire exhaustif a été réalisé sur trois placettes d'un hectare chacune en Mai 2012. Il a consisté à mesurer la circonférence à 1.30 m de toutes les tiges. Les fréquences relatives sont reportées dans les histogrammes de la figure 2 et montrent que la classe de circonférence

20-40 cm est la plus dominante pour toutes les placettes. Cet inventaire montre également que la densité des peuplements oscille entre 1400 et 2000 tiges/ha. Ces différences de densité n'ont pas d'effet significatif sur la circonférence moyenne. En effet, les trois placettes présentent une structure régulière dont le mode est situé dans la classe de circonférence de 30 cm (Tableau 1).

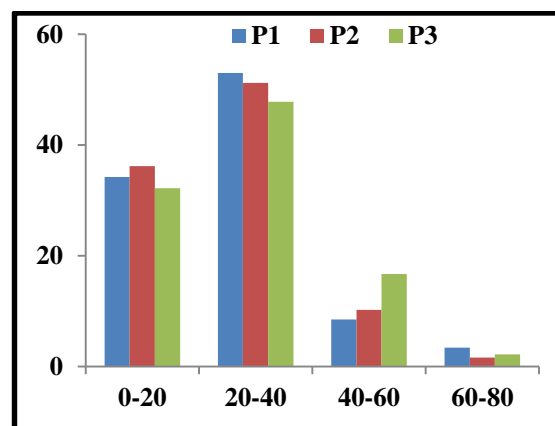


Figure 2 : Structure du taillis d'*Eucalyptus camaldulensis* dans les trois placettes

Tableau 1

Certains résultats d'inventaire sur les trois placettes d'études

Placette	Nt.ha ⁻¹	C _{1.30} moy. (cm)	S.T. (m ² .ha ⁻¹)	Délit (Nt coupées)
P ₁	1 872	30.2	7.0	648
P ₂	2 016	30.0	7.6	560
P ₃	1 440	29.6	6.0	736
Moyenne	1 776	30.0	6.9	636

C_{1.30} moy. : Circonférence à 1.30 m. ; S.T. : Surface terrière. ; Nt : Nombre de tiges ; P₁, P₂ et P₃ : Placettes d'études.

B. Echantillonnage des arbres pour la construction des tarifs de biomasse et de minéralomasse :

Pour les trois placettes, 20 tiges représentatives de la structure du taillis par classe de circonférence ont été choisis. Après abattage, on mesure la hauteur totale de la tige, la circonférence du tronc à chaque mètre et le poids frais de chaque billon. Chaque tige abattue est ébranchée et les aliquotes des différents compartiments (feuilles, rameaux, branches, tronc, branches mortes) sont analysés au laboratoire. La pesée des échantillons avant et après séchage à 65°C (jusqu'à poids constants) permet de déterminer le taux d'humidité des différents compartiments, ce qui permet de calculer leur biomasse sèche.

C. Récolte des chûtes de litière :

Pour quantifier la biomasse de chute de litière, une installation aléatoire de vingt quadras de (1 m²) à l'intérieur de chaque parcelle selon des transects, espacés de 10 m les uns des autres a été nécessaire. La récolte n'est pas individualisée par quadrat, c'est-à-dire qu'on considère les récoltes par parcelle. La quantification de la biomasse des chûtes de litière est limitée à déterminer les quantités de feuilles, branches et écorce. La récolte de ces fractions a duré une année et à la fin de chaque mois, les trois fractions (feuilles, branches et écorces) sont recueillies et séparées manuellement. Pour chaque placette on a déterminé sur place le poids frais des trois

principales fractions de la litière pris en considération. Des échantillons de 200 g ont été amenés au laboratoire afin de déterminer le taux d'humidité et la teneur en éléments nutritifs majeurs.

D. Echantillonnage des sols pour mesure du stock d'éléments nutritifs et la densité apparente des sols :

- *Mesure de la densité apparente du sol*

La densité apparente du sol a été évaluée sur une fosse pédologique au milieu de chaque carreau en utilisant un cylindre de densité de 250 cm³. À cette fin, un cylindre a été inséré horizontalement à partir de la paroi de la fosse avec un marteau en caoutchouc, puis doucement enlevée avec un couteau et l'excès de terre a été enlevé. Les cylindres de densité ont été vidés dans des sacs en plastique (de poids connus) et leurs poids ont été évalués pour chaque échantillon après séchage à 65°C jusqu'à poids constant, ce qui permet de calculer une densité apparente du sol (d_a : masse de sol sec pour un volume donné) en kg.dm⁻³ [8, 9, 13].

- *Prélèvement des échantillons de sols pour analyses physico-chimiques*

L'échantillonnage de cinq profils par placette a été fait à la tarière sur cinq profondeurs (tous les 20 cm jusqu'à 100 cm de profondeur). Après, séchage et tamisage avec une maille de 2 mm, les échantillons de sols ont été analysés conformément aux méthodes décrites par Duchaufour [15]. L'analyse granulométrique a été effectuée par la méthode de la pépite de Robinson. Le dosage du phosphore assimilable est réalisé à l'aide de la méthode d'Olson [15] La teneur en carbone organique a été dosée par la méthode de Walkey-Black [16]. Le dosage d'azote total et des bases échangeables (Ca, Mg et K) a été effectué en utilisant respectivement la méthode de distillation Kjeldahl (Buchi 323) et la spectrophométrie d'absorption atomique (GBC 906AA).

La comparaison des sols sous *Eucalyptus camaldulensis* et des sols agricoles prélevés aléatoirement sur cinq profils (Tableau 2) ne permet pas de trouver de différences notaires :

- Les pH moyens sont voisins (entre 4,8 et 5,6) ainsi que les rapports C/N (entre 19 et 24) dans les 40 premiers centimètres.

- Les sols des trois placettes d'études et des sols agricoles à différentes profondeurs sont sableux (% sable > 94%)
- La densité apparente est élevée sur tout le profil de sols et supérieure à 1,6 g.cm⁻³ en surface et à 2 g.cm⁻³ entre 40 et 100 cm.

On trouve des différences pour la teneur en phosphore et en potassium. En effet, la teneur en P et K sont plus supérieure dans les couches profondes des sols agricoles ceci peut être grâce à l'ajout de fertilisants.

- *Calcul du stock d'éléments nutritifs de sols*

Pour évaluer la quantité q_{ij} d'un élément nutritif (i) dans un horizon donné (j) du sol (t.ha⁻¹), l'estimation de trois paramètres est indispensable [17-20] :

$$q_{ij} = 0.1 * E_j * d_{a_i} * C_i \quad (1)$$

où :

E_j : épaisseur de l'horizon (j) en cm,

d_{a_i} : densité apparente de la fraction fine (inférieure à 2 mm) dans l'horizon (j) en g.cm⁻³,

C_i : concentration de l'élément (i) dans la terre fine pour l'horizon (j) en g.kg⁻¹.

Tableau 2

Propriétés physico-chimiques des sols des placettes d'études et des sols agricoles.

	Pr. (cm)	pH	da	% C	N (ppm)	C/N	P (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)
P ₁	0-20	5,4	1,7	1,66	810	20,5	14	115	150	157
	20-40	5,3	1,9	0,62	275	22,5	11	66	95	145
	40-60	5,2	2,1	0,19	81	23,5	9	44	49	38
	60-80	6	2,1	0,01	5	20	7	32	42	43
	80-100	5,3	2,1	0,01	4	25	7	39	38	42
P ₂	0-20	5,7	1,6	1,5	766	19,6	16	125	168	145
	20-40	5,5	1,9	0,53	210	25,2	9	68	72	144
	40-60	5	2,0	0,15	66	22,7	8	47	63	37
	60-80	5,8	2,1	0,01	4	25	5	44	67	42
	80-100	5,5	2,2	0,01	3	33,3	5	38	30	39
P ₃	0-20	5,1	1,9	1,34	790	17	16	110	186	142
	20-40	4,8	1,8	0,38	224	17	8	55	50	147
	40-60	5,0	2,0	0,12	56	21,4	7	46	38	34
	60-80	5,1	2,1	0,01	3	33,3	6	43	80	35
	80-100	5,1	2,1	0,01	3	33,3	4	29	28	37
Moyenne	0-20	5,4	1,7	1,5	789	19	15	122	168,0	148,0
	20-40	5,2	1,9	0,51	236	21,6	9	64	72,3	145,3
	40-60	5,1	2,0	0,15	68	22,7	8	46	50,0	36
	60-80	5,6	2,1	0,01	4	25	6	40	63,0	40
	80-100	5,3	2,1	0,01	3	30	5	39	32,0	39
Sol agricole	0-20	4,9	1,8	0,37	204	21,1	12	63	156	135
	20-40	4,8	1,9	0,1	51	23,7	7	48	78	113
	40-60	5,0	2,1	0,03	12	25,4	5	66	24	49
	60-80	4,7	2,2	0,01	5	20,9	17	47	65	52
	80-100	4,9	2,0	0,01	4	25,7	16	73	70	36

Pr. : Profondeur - A. : Argile - L. : Limon - S. : Sable - da : Densité apparente des sols –
C : Carbone - N : Azote, P. : Phosphore - K : Potassium - Ca : Calcium - Mg : Magnésium.

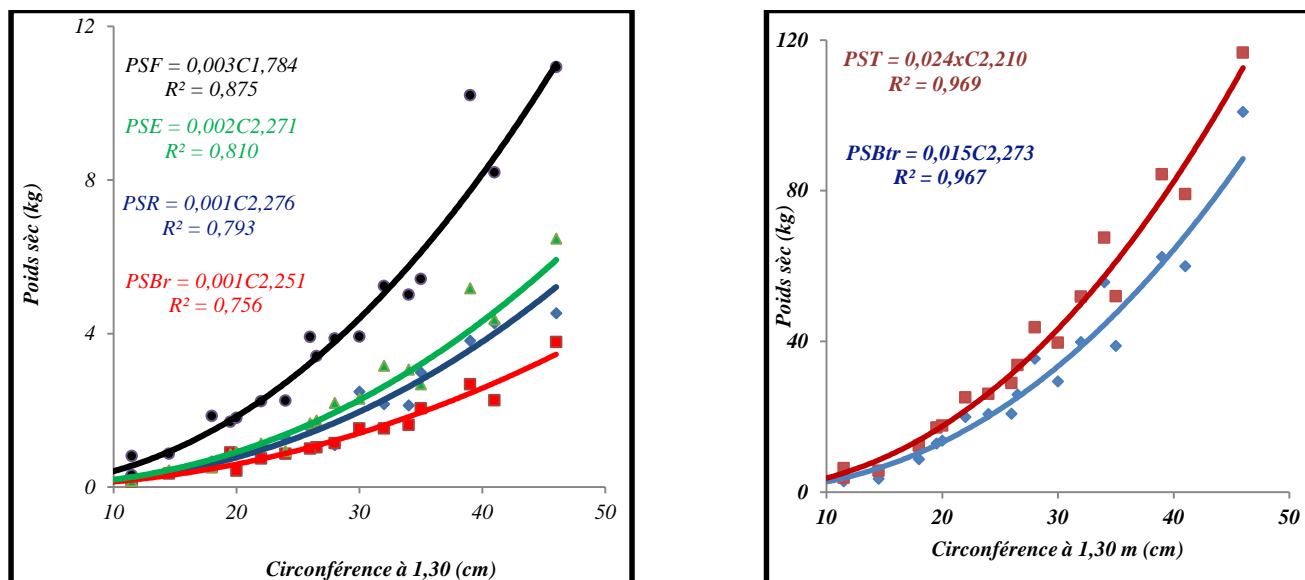
3. Résultats et discussions

3.1 Biomasse sèche

- *Biomasse aérienne :*

La circonférence à 1.30 m (C_{1,30}) a une influence remarquable sur les poids secs des différents compartiments de l'arbre (bois du tronc, branches,

écorce du tronc, rameaux et feuilles). La modélisation de la biomasse de ces compartiments et la biomasse totale en fonction de la circonférence à 1.30 m (Figure 3). Pour le poids des branches mortes, la tendance nette de l'allocation en fonction de la circonférence à 1.30 m n'as pas été prouvée ; par conséquent leurs biomasse est donnée par moyenne pour chaque placette.



PSF, PSBtr, PSBr, PSE, PSBm, PSR, PSF sont respectivement les poids sec total, du bois du tronc, des branches, de l'écorce du tronc, des branches mortes, des rameaux et des feuilles.

Figure 3 : Biomasse totale épiquée et des différents composantes en fonction de la circonférence à 1,30m.

L'application des tarifs de phytomasse sur l'ensemble des arbres mesurés par l'inventaire permettra de calculer la biomasse aérienne totale et déterminer sa répartition entre les différents compartiments à savoir bois du tronc, écorce du tronc, branches, rameaux et feuilles. Les résultats sont exprimés en tonnes de matière sèche et ramenés à l'hectare (Tableau 3).

Tableau 3
Répartition de la biomasse sèche (t_{MS}.ha⁻¹) dans les différentes composantes du taillis d'*Eucalyptus camaldulensis*.

	P ₁	P ₂	P ₃	Moy.	%
Feuilles	1.50	1.6	1.2	1.4	3.8
Rameaux	2.00	2.1	1.7	1.9	5.1
Branches	1.90	1.9	1.5	1.8	4.7
Ecorce du tronc	3.40	3.6	2.8	3.3	8.7
Bois du tronc	29.7	31.1	24.6	28.5	75.7
Bois mort	0.70	0.8	0.6	0.7	1.9
Total	39.20	41.1	32.4	37.6	99.9
Exporté	35.00	36.6	28.9	33.5	89.1
Productivité (t.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	3.20	3.4	2.7	3.1	8.3

La biomasse sèche moyenne des peuplements sur pieds, dans les trois placettes étudiées, est de l'ordre de 37 t_{MS}.ha⁻¹. Le bois du tronc constitue le compartiment le plus important avec près de 76% de matière végétale sèche aérienne. Viennent ensuite le compartiment écorce du tronc avec environ 9%, les compartiments branches et rameaux avec environ 5% chacun, les feuilles avec 4% et

enfin les branches mortes avec moins de 2% (Tableau 3). La partie exportée (tronc et branches) lors de l'exploitation est de l'ordre 33 t_{MS}.ha⁻¹, soit près de 89% de la matière sèche aérienne.

Pour l'estimation de la biomasse prise par délit, on a procédé à déterminer la relation qui lie la circonférence basale (C₀) et la circonférence à 1,30 m (Figure 4). La biomasse moyenne totale obtenue, en appliquant les équations allométriques obtenues précédemment (Figure 3), est de l'ordre de 10.4 t_{MS}.ha⁻¹ (Tableau 4) ; répartie entre le bois du tronc (8.9 t_{MS}.ha⁻¹), l'écorce du tronc en (1.0 t_{MS}.ha⁻¹) et les branches (0,5 t_{MS}/ha).

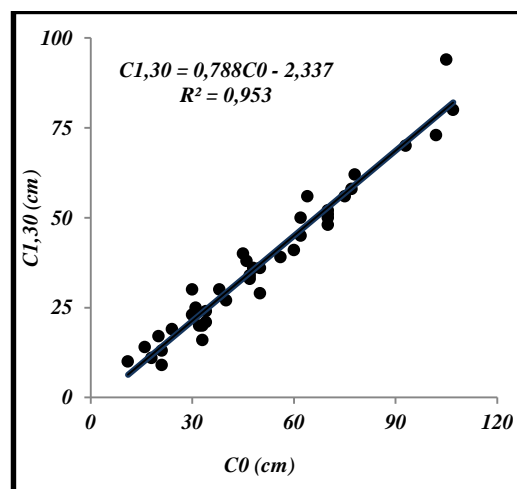


Figure 4 : Relation entre la circonférence à 1,30 m (C_{1,30}) et la circonférence basale (C₀)

Tableau 4
Quantité de bois pris par délais ($t_{MS}.ha^{-1}$).

	P ₁	P ₂	P ₃	Moy.
Branches	0,7	0,4	0,5	0,5
Ecorce du tronc	1,3	0,7	1,1	1,0
Bois du tronc	11,2	7,4	8,2	8,9
Total	13,2	8,5	9,8	10,4

Les résultats trouvés par Cortez [21] et Fabio [22] pour l'*Eucalyptus globulus* en Espagne ($112 t_{MS}.ha^{-1}$) à l'âge de 9 ans et par Nguyen [23] pour les plantations clonales d'eucalyptus au sud de la France ($153 t_{MS}.ha^{-1}$) montrent que la biomasse sèche aérienne de nos taillis d'*Eucalyptus camaldulensis* âgé de 11 ans reste très inférieure et ne dépasse pas dans sa totalité (sur pieds + délit) 50 t/ha.

Tableau 5
Masse de litière restituée au sol annuellement ($t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$)

Sites	Feuilles		Branches		Ecorce		Total
	Nécromasse	%	Nécromasse	%	Nécromasse	%	
P ₁	1.20	73.2	0.31	18.9	0.13	7.9	1.64
P ₂	1.32	67.7	0.43	22.1	0.20	10.3	1.95
P ₃	1.13	78.5	0.20	13.9	0.11	7.6	1.44
Moyenne	1.62	72.6	0.41	18.5	0.15	8.9	1.68

- *Chute de litière*

Les résultats de la biomasse des chûtes de litière récoltée mensuellement, pendant une année, dans les quadrats et ramenée en tonne de matière sèche par hectare sont regroupés dans le tableau 5 ci-dessus.

La quantité de litière restituée annuellement au sol se situe entre 1.4 et $2 t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$. Quel que soit la placette, ce sont les feuilles qui constituent la plus grande partie de la litière ; plus de 70%. A noter aussi la part non négligeable des branches et de l'écorce qui représentent en moyen respectivement environ 19 et 9% de la litière. Le taillis d'*Eucalyptus camaldulensis* restitue comme tout arbre une quantité importante de matière organique au sol par l'intermédiaire de ses chûtes de litière ($1,7 t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$). Cette quantité toutefois reste très inférieure à celles rapportées pour les plantations d'*Eucalyptus globulus* au Portugal $12.8 t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$ [21] et au Congo $6 t_{MS}.ha^{-1}.an^{-1}$

- *Biomasse souterraine*

C'est principalement la partie souterraine (souches et racines) qui confère aux eucalyptus une grande capacité de production de biomasse puisqu'elle représente environ 70% de la biomasse végétale [24], grâce aux réservoirs constitués par les grosses racines et les souches qui représentent respectivement un et deux tiers de la biomasse souterraine [24]. Par conséquent, nos plantations d'*Eucalyptus camaldulensis* ont une biomasse souterraine de l'ordre de $110 t_{MS}.ha^{-1}$ ($37 t_{MS}.ha^{-1}$ pour les grosses racines et $73 t.ha^{-1}$ pour les souches). Donc, la biomasse totale (aérienne y compris les délits et souterraine) est de l'ordre de $148 t_{MS}.ha^{-1}$; résultat comparable à celui obtenu par Razakamanarivo [24] pour les taillis d'*Eucalyptus* de Madagascar (sans tenir compte des délits) ($120 t_{MS}.ha^{-1}$).

[9] pour les plantations clonales d'eucalyptus d'âges entre 2 et 7 ans.

3.2 Minéralomasse et stock du sol en éléments nutritifs assimilables

- *Minéralomasse de la biomasse aérienne*

Les teneurs des éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca et Mg) ont été reportées dans le tableau 6. Les concentrations des bioéléments varient considérablement entre les composantes de l'arbre. En effet, ce sont les feuilles et les rameaux, les organes les plus jeunes des arbres, qui présentent les concentrations les plus élevées en N, P et K alors que la concentration du calcium est élevée dans l'écorce ($35\ 400$ ppm). Par contre, le bois du tronc est l'organe qui présente les concentrations les plus faibles pour tous les éléments nutritifs.

Les quantités des éléments nutritifs ont été calculées en multipliant la teneur de chaque élément par la biomasse du compartiment considéré. Les résultats présentés dans le tableau 6 montrent que la minéralomasse, des cinq éléments majeurs (N, P, K, Ca et Mg), dans la partie aérienne des peuplements sur pieds est de l'ordre de 461 kg.ha⁻¹. Le calcium est l'élément le plus prépondérant (50%) suivi de l'azote et du potassium qui représentent respectivement 25 et 12% de la minéralomasse. L'élément le moins présent est le phosphore (3.2%) suivi de près par le magnésium (9.6%). On retrouve en particulier l'importance des petits compartiments de biomasse, telles

que les feuilles et les rameaux dans la fixation de bioéléments. En effet, les rémanents (feuilles et rameaux) qui ne représentent que 8.9% de la biomasse épigée fixent 25% d'éléments nutritifs. Alors que, le bois du tronc qui représente plus de 75% de la biomasse n'immobilise qu'environ 30% d'éléments nutritifs. Ceci est dû aux concentrations élevées de l'azote et le potassium dans les jeunes compartiments (feuilles et rameaux). Par contre, l'écorce du tronc dont la biomasse ne dépasse pas 9% immobilise plus de 34% de la minéralomasse dont le calcium représente plus de 73%.

Tableau 6 : Composition chimique et minéralomasse des compartiments de la biomasse aérienne.

	N	P	K	Ca	Mg	Total	Pourcentage
<i>Teneurs en éléments nutritifs majeurs (ppm)</i>							
Feuilles	17 560	980	7 100	11 079	1 690	-	-
Rameaux	9 350	1120	6 300	12 700	1 430	-	-
Branches	5 470	650	5 230	12 900	1 050	-	-
Ecore du tronc	4 530	540	4 850	35 400	2 791	-	-
Bois du tronc	1 580	290	267	1 800	962	-	-
Bois mort	1 840	75	211	3 938	1 520	-	-
<i>Minéralomasse de la biomasse aérienne sur pieds sur place (kg.ha⁻¹)</i>							
Feuilles	25.1	1.4	10.2	15.8	2.4	54.9	11.9
Rameaux	18.0	2.2	12.1	24.4	2.7	59.3	12.9
Branches	9.7	1.2	9.3	23.0	1.9	45.1	9.8
Ecorce du tronc	14.8	1.8	15.9	115.9	9.1	92	34.1
Bois du tronc	45.0	8.3	7.6	51.3	27.4	139.5	30.2
Bois mort	1.3	0.1	0.1	2.7	1.0	15.9	1.1
Total sur pieds	113.9	14.8	55.2	233.1	44.5	461.4	100.0
Pourcentage	24.7	3.2	12.0	50.5	9.6	100	-
Im. An. (t.ha⁻¹.an⁻¹)	8.1	1.2	4.1	19.8	3.8	37.0	-
<i>Minéralomasse des débits (kg.ha⁻¹)</i>							
Branches	3.8	0.5	3.7	9	0.7	17.7	16.2
Ecorce du tronc	4.5	0.5	4.9	35.4	2.8	48.1	43.9
Bois du tronc	14.1	2.6	2.4	16	8.6	41.9	38.3
Total des débits	22.4	3.6	11	60.4	12.1	109.5	100.0
<i>Minéralomasse aérienne totale (débit + exploitation) (kg.ha⁻¹)</i>							
Total	136.3	18.4	66.2	293.5	56.6	570.9	-
Im. An. (t.ha⁻¹.an⁻¹)	10.1	1.5	5.1	25.2	4.9	46.9	-

Im. An. : Immobilisation annuelle

Les rémanents et l'écorce du tronc représentent moins de 18% de la biomasse aérienne totale, mais ils accumulent plus de 50% d'azote, 36% de phosphore, 69% de potassium, 67% de calcium et 32% de magnésium. Alors que, la biomasse ligneuse (bois du tronc et branches), qui représente plus de 80% de la biomasse sur pieds, séquestre moins de 49% d'azote, 64% de phosphore, 31% de potassium, 32% de calcium et 66% de magnésium. Ce qui peut être expliqué par les concentrations élevée en azote dans les jeunes compartiments (feuilles et rameaux). La quantité de bioéléments exportée par délit est de 109.5 kg.ha⁻¹, soit environ 24% de la minéralomasse de la biomasse sur pieds (Figure 6).

• *Immobilisation annuelle de bioéléments :*

Pour évaluer ce paramètre, nous avons multiplié l'incrément annuel en poids de chacune des composantes (écorce du tronc, bois du tronc, branches et rameaux) par sa composition chimique moyenne [25, 26]. Ceci permet d'évaluer les immobilisations annuelles moyennes des éléments nutritifs majeurs (Tableau 6). Pour l'ensemble des cinq éléments analysés et pour toute la biomasse totale (délit + sur pieds), l'immobilisation annuelle moyenne est de l'ordre de 46.9 kg.ha⁻¹ dont le calcium représente presque 54% suivi d'azote (22%) et de potassium (11%).

Tableau 7
Composition chimique et minéralomasse de la biomasse souterraine.

	N	P	K	Ca	Mg	Total	%
<i>Composition chimique (ppm)</i>							
Racines	3 860	550	3 650	16 700	1 140	-	-
souches	2 020	240	1 460	6 840	830	-	-
<i>Minéralomasse en kg.ha⁻¹</i>							
Racines	142.8	20.5	134.9	617.9	42.3	958.4	53.6
souches	147.6	17.6	106.5	499.3	60.3	831.2	46.4
Total	290.5	55.5	241.4	1 117.2	102.6	1 789.6	100.0
Pourcentage	16.2	2.1	13.5	62.4	5.7	100.0	
Immobilisation	5.8	0.8	4.8	22.3	2.1	35.8	

• *Minéralomasse de la biomasse souterraine*

La composition chimique moyenne et la quantité obtenues pour les cinq éléments nutritifs majeurs dans la souche et les racines sont regroupées dans le tableau 7 ci-dessus. La biomasse souterraine fixe une grande quantité en bioéléments (1.8 t.ha⁻¹) dont le calcium constitue plus de 62%. Ainsi, comparativement à la biomasse aérienne sur pieds, La biomasse souterraine immobilise presque quatre fois plus en éléments nutritifs majeurs.

Si, on admet que le déssouchement s'effectue après la troisième rotation des taillis (environ 50 ans), l'immobilisation moyenne annuelle de la minéralomasse sera de l'ordre 36 kg.ha⁻¹.an⁻¹, qui restent inférieure à celle de la biomasse aérienne totale (46.9 kg.ha⁻¹.an⁻¹). Par conséquent, un arbre

d'*Eucalyptus camaldulensis* immobilise en moyenne environ 83 kg.ha⁻¹.an⁻¹.

• *Minéralomasse dans la litière*

Dans le tableau 8, nous avons regroupés la composition chimique moyenne obtenue pour les cinq éléments nutritifs majeurs dans les trois fractions principales des chutes de litière des trois parcelles.

Tableau 8
Teneur et quantité moyennes des éléments majeurs pour la litière.

	Biomasse t _{MS} /ha/an	N	P	K	Ca	Mg	Total	Pourcentage
<i>Composition chimique (ppm)</i>								
Feuilles		9 500	543	896	29 086	1 407	-	-
Branches		3 760	428	1 663	19 120	1 379	-	-
Ecorce		2 570	90	267	3 430	962	-	-
<i>Quantité (kg.ha⁻¹)</i>								
Feuilles	1.22	11.59	0.66	1.09	35.48	1.72	50.55	84.51
Branches	0.31	01.17	0.13	0.52	05.93	0.43	08.08	13.66
Ecorce	0.15	00.39	0.01	0.04	00.51	0.14	01.10	01.84
Total	1.68	13.14	0.80	1.65	41.93	2.29	59.81	100.01
Pourcentage	21.97	01.35	2.76	70.10	03.83	100.01		

Ces teneurs sont assez nettement différentes des teneurs des mêmes compartiments de l'arbre sur pieds. On remarque une baisse générale des teneurs et surtout ceux d'azote, phosphore et potassium. Par contre, le taux de calcium augmente pour les feuilles et les branches.

Les chûtes de litière des plantations d'*Eucalyptus camaldulensis* renferment des quantités non négligeables d'éléments nutritifs et représentent un flux important d'éléments dans cet écosystème. Environ, 13 kg.ha⁻¹ d'azote, 0.8 kg/ha de phosphore, 1.6 kg.ha⁻¹ de potassium, 42 kg.ha⁻¹ de calcium et 2.3 kg.ha⁻¹ de magnésium retournent au sol chaque année par l'intermédiaire des chutes de litière. Ces quantités restent très inférieures aux valeurs trouvées dans les plantations d'*Eucalyptus* au Congo [27]. Plus de 84% des cinq éléments nutritifs majeurs est produit par les feuilles et moins de 2% sont fournis par l'écorce. La somme de minéralomasse restituée au sol par les chutes de

litière représente 13% de la minéralomasse aérienne sur pieds.

Individuellement, le calcium est l'élément nutritif le plus retournant au sol par l'intermédiaire de la litière (70%), suivi d'azote (22%), du magnésium (4%) et du potassium (3%). Le phosphore restitué au sol par les chutes de litière représente moins de 2% de bioéléments retournant au sol.

- *Stock du sol en éléments nutritifs assimilables*

Pour le calcul des stocks des éléments nutritifs majeurs des sols (Tableau 9), les teneurs moyennes de ces éléments (Tableau 2) ont été appliquées au volume de sol des différentes couches. Les calculs de ces stocks ont été faits pour la profondeur d'un mètre qui sera référence pour la suite de l'étude et il a été également fait pour la profondeur de 60 cm pour déterminer les classes de fertilité selon Bonneau [28].

Tableau 9
Stocks des éléments nutritifs majeurs des sols en kg.ha⁻¹.

	Profondeur (Pr.)	N	P	K	Ca	Mg	Total	%
	0-20	2 682	51	413	571.1	503.2	4 220.3	51.5
	20-40	897	34.2	241.5	281.2	551	2 004.9	24.5
	40-60	272	32	184	200	144	832	10.2
Moyenne	60-80	17	25.2	168	264.6	168	642.8	7.8
	80-100	13	21	161.5	134.4	164	493.9	6.0
	Total à 0.6 m de Pr.	3 851	117.2	838.5	1052.3	1 198.2	7 057.2	86.1
	Total à 1 m de Pr.	3881	163.4	1168	1451.3	1530.2	8193.9	100.0
	0-20	734	43	225	561.6	486	2 049.6	36.7
	20-40	194	27	184.5	296.4	429.4	1131.3	20.3
	40-60	50	21	277	100.8	205.8	654.6	11.7
Sols agricoles	60-80	22	75	339	286	228.8	950.8	17.0
	80-100	16	64	294	280	144	798	14.3
	Total à 0.6 m de pr.	978	91	686.5	958.8	1121.2	3 835.5	68.7
	Total à 1 m de pr.	1016	230	1319.5	1524.8	1494	5584.3	100.0

Pour une profondeur d'un mètre, les éléments prépondérants sont l'azote pour les sols sous eucalyptus (3.9 t.ha⁻¹) et le calcium (1.5 t.ha⁻¹) pour les sols agricoles. Conformément aux observations sur les teneurs, les sols agricoles sont riches en phosphore (230 kg.ha⁻¹) et en potassium (1.3 t.ha⁻¹) surtout dans les couches profondes, ce qui peut être expliqué par le lessivage des fertilisants.

Si l'on se réfère aux classes de fertilité de Bonneau (1995) pour les éléments nutritifs majeurs (sur 60 cm), le magnésium a une très bonne fertilité car son stock est supérieur à 0.35 t.ha⁻¹. Alors que, la fertilité en potassium est moyenne du fait que son stock est compris entre 0.51 et 0.85 t.ha⁻¹. Mais, la fertilité en calcium et en phosphore est très faible pour les sols sous eucalyptus et les sols agricoles car leurs stocks sont inférieurs respectivement à 1,8 et 0,43 t.ha⁻¹.

- *Scénario d'exploitation de la biomasse sur pieds*

Selon le scénario classique d'exportation au Maroc tel que représenté dans le tableau 8, presque la totalité de la biomasse est exportée hors de la parcelle lors de son exploitation. En effet, l'exportation du bois avec ou sans écorçage, dont la C_{1.30} > 7 cm, destiné à la production de la pâte à papier, des perches, du charbon ou autre(s)

produit(s). Ainsi, plus de 80% des rémanents est utilisée soit pour allumer les charbonnières ou par les riverains comme bois de feu. En plus, le Haut Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification exige le nettoyage de la parcelle exploitée par l'entrepreneur pour éviter toute cause d'incendie.

Considérons dans un premier temps le scénario d'exploitation classique au Maroc (scénario 4, Tableau 10). L'exportation représente globalement environ 5% du stock total de la parcelle (compartiment aérien + sol). Mais des différences de pertes importantes apparaissent entre les éléments. Les pertes en N, Mg, P et K sont relativement limitées (2.6 à 4.1). Par contre, de forte perte est observée pour le phosphore et le calcium (respectivement environ 8 et 13%).

Dans le deuxième scénario d'exploitation, l'écorce et les rémanents sont laissés sur place (scénario 1). L'écorce étant riche en calcium, cette option permet de diminuer le pourcentage de perte en cet élément (de 13.2% à 4.4%). Pour ce qui concerne le phosphore, l'écorçage permet de gagner 2.6 point sur le pourcentage de perte, ce qui est très important car les sols très pauvres en calcium et en phosphore.

En considérons uniquement la minéralomasse du peuplement sur pieds, on constate que plus de 91% de phosphore, d'azote et de potassium et plus de 95% de calcium et de magnésium seront exportés. Alors que, selon le scénario suivi par l'Espagne (scénario 1 ; mais avec circonférence de la coupe supérieure à 10 cm) seulement 44% de phosphore, 48% d'azote, 30% de potassium, 32% de calcium et 66% de magnésium seront exportés lors de l'exploitation. Ce qui montre que notre

scénario exporte beaucoup plus d'éléments nutritifs et surtout le calcium.

Si l'écorçage sur place demande un financement élevé, on propose une exploitation entre les deux scénarios, exportant le bois et l'écorce jusqu'à une circonférence de 7 cm (scénario 3). Ceci permettra un gain de fertilité par rapport au scénario classique pratique au Maroc (Scénario 1) de 13% d'N, 14% de P, 29% de K, 18% de Ca et 34% de Mg.

Tableau 10
Quantités et pourcentages de bioéléments exportés lors de l'exploitation selon différents scénarios.

	N	P	K	Ca	Mg	Total	Pourcentage
<i>Quantités des éléments (kg.ha⁻¹)</i>							
Scénario 1	54.7	9.4	16.9	74.2	29.3	184.6	40.0
Scénario 2	97.8	13.0	39.2	114.5	34.4	298.8	64.8
Scénario 3	69.5	11.2	32.8	190.0	38.4	341.9	74.1
Scénario 4	104.0	14.0	50.6	222.2	42.5	433.3	93.9
Scénario 5	112.6	14.7	55.0	230.2	43.6	456.1	98.9
<i>Pourcentages de bioéléments</i>							
Scénario 1	48.1	63.7	30.7	31.9	65.6	40.0	-
Scénario 2	85.9	87.7	71.0	49.1	77.2	64.8	-
Scénario 3	61.1	75.6	59.4	81.6	86.1	74.1	-
Scénario 4	91.3	94.8	91.7	95.4	95.3	93.9	-
Scénario 5	98.9	99.6	99.7	98.8	97.6	98.9	-

Scénario 1 = Exportation de bois dont la circonférence est supérieure de 7 cm avec écorçage ;

Scénario 2 = Scénario 1 + exportation de la totalité des rémanents ;

Scénario 3 = Exportation de bois dont la circonférence est supérieure de 7 cm sans écorçage ;

Scénario 4 = Scénario 3 + Récolte de 80% de rémanents ;

Scénario 5 = Récolte de l'arbre entier.

A tous les quantités de bioéléments exportées lors de l'exploitation selon les différents scénarios s'ajoute une perte de 110 kg.ha⁻¹ d'éléments nutritifs par les délits répartie entre 22.4 kg.ha⁻¹ d'azote, 3.6 kg.ha⁻¹ de phosphore, 11 kg.ha⁻¹ de potassium, 60.4 kg.ha⁻¹ de calcium et 12.1 kg.ha⁻¹ de magnésium. Et ceci sans tenir compte de la minéralomasse exportée lors du dessouchage après la 3^{ème} coupe des taillis d'eucalyptus. Cependant, l'exportation de la biomasse forestière doit assurer le maintien de la biodiversité et de la productivité de l'eucalyptus ainsi que la protection des sols forestiers et la qualité de l'eau. Le prélèvement de l'écorce, des feuilles et des rameaux constitue une perte importante d'éléments nutritifs pour notre écosystème forestier, et a comme

conséquence probable de réduire la fertilité des sols. D'une manière générale, les sols forestiers pauvres et de texture grossière sont qualifiés sensibles à la récolte de la biomasse [29, 30]. En effet, la récolte la biomasse forestière qui immobilise des minéraux alcalins et l'acidité des dépôts atmosphériques [31] sont les deux facteurs qui contribuent à l'acidification des sols forestiers.

- *Comparaison du prélèvement et stock du sol*

Le prélèvement correspond à la masse de nutriments que les plantes vont prélever annuellement dans le sol (kg.ha⁻¹.an⁻¹) ; il est l'indicateur le plus pertinent pour comparer

les besoins des arbres au stock du sol à un instant donné. Le prélèvement est défini comme étant la somme des éléments immobilisés dans la biomasse (aérienne totale (sur pieds + délit) + souterraine)) et les éléments restitués au sol sous forme solide (litière) ou en solution

(récréation). Pour la récréation, en l'absence de référence pour l'eucalyptus en plaine méditerranéenne, nous avons estimé la récréation du potassium à 50% de la restitution [32] et nous avons négligé la récréation des autres éléments (Tableau 11).

Tableau 11
Comparaison du prélèvement au stock du sol en nutriments

	N	P	K	Ca	Mg
Immobilisation aérienne	10.1	1.5	5.1	25.2	4.9
Immobilisation souterraine	5.8	0.8	4.8	22.3	2.1
Immobilisation totale	15.9	2.3	9.9	47.5	8.0
Litière	13.1	0.8	1.7	41.9	2.3
Récréation			0.8		
Prélèvement	29	3.1	12.4	89.4	9.3
Stock du sol à 60 cm	3851	117.2	838.5	1052.3	1198.2
Stock du sol/prélèvement	133	38	68	12	129

Bonneau [28] indique que pour avoir une bonne durabilité du système forestier, le stock du sol à une profondeur de 60 cm doit être 20 fois supérieur au prélèvement pour les éléments mobiles K, Ca et Mg et 50 fois plus élevé pour le phosphore. Si l'on tient compte à ces seuils, on observe que les sols sous *eucalyptus camaldulensis* sont pourvus en calcium et en phosphore.

4. Conclusion

L'élaboration des modèles d'allocation entre les différents compartiments d'un taillis d'*eucalyptus camaldulensis* à la fin de la 2^{ème} rotation permet de quantifier les quantités de bioéléments N, P, K, Ca et Mg fixés dans les composantes aériennes. Le prélèvement moyen annuel de ce taillis est estimé à 10,1 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de N, 1,5 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de P, 5,1 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de K, 25,2 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de Ca et 4,9 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de Mg. Parallèlement, l'analyse des sols révèle des stocks très faibles phosphore et en calcium. La comparaison des sols sous *eucalyptus camaldulensis* et des sols agricoles adjacents ne montre pas de différence significative en termes de stock minéral et des propriétés physico-chimiques.

Mener une plantation d'eucalyptus, essence à croissance rapide, en taillis à courte rotation sur des durées de 12 ans suppose une bonne disponibilité en eau et en nutriment

pour parvenir aux meilleurs niveaux de productivité ; ce qui n'est pas le cas pour les sols de la plaine étudiée (sols sableux (% sable > 94), acide et dépourvu de carbonate). En plus, l'exportation liée à l'exploitation classique (scénario 4) représente 91% de la biomasse et 94% de la minéralomasse (plus de 91% pour l'azote, le phosphore et le potassium et plus de 95% pour le calcium et le magnésium).

Le calcul des stocks de sols et des besoins des arbres révèle un déficit potentiel en phosphore et en calcium. Par conséquent, il est possible que les rotations suivantes voient des chutes de productivité si rien n'est entrepris pour compenser les déficiences. En effet, La minéralomasse exportée doit être mise en regard du stock de minéraux de sols. Le calcul du prélèvement exprimant le besoin annuel des taillis constitue la meilleure approche pour estimer l'impact de la plantation sur le stock du sol à un instant donné. On s'aperçoit que le phosphore et le calcium sont présents en faibles quantités au regard des besoins et que l'on se situe en dessous du seuil de durabilité donnée par Bonneau [28].

La première action envisageable est de laisser les rémanents et réaliser l'écorçage lors de l'exploitation, c'est-à-dire laisser sur la parcelle les rémanents qui sont très riches en éléments nutritifs et en particulier en phosphore et l'écorce qui est très riche en calcium. Ces

deux opérations sont surtout favorables au calcium et au phosphore qui sont présent en quantités faibles dans les sols. Au final, l'écorçage (pratique très répandue en Espagne) est toujours positif mais son intérêt doit être mis en rapport à la perte de productivité lors de l'exploitation et donc le surcoût qu'entraîne cette technique. La deuxième action envisageable est d'avoir recours à une fertilisation qui pourrait être moins coûteuse et avoir un impact plus significatif sur le stock d'éléments nutritifs. Les pratiques actuelles consistent à effectuer une fertilisation NPK à l'installation des plantations. Même si l'on n'observe pas de réaction de tonification lors de la 1^{ère} rotation des taillis, il paraît souhaitable maintenant d'envisager une fertilisation phosphore et de calcium après chaque exploitation.

Références

- [1] M. Deheza, V. Bellassen, 2010, « Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France », CDC Climat : Etude du climat, N° 20, 52 pp.
- [2] N. Nguyen, B. Chaste, 2006. « Eucalyptus et environnement », Fiche n° 725, AFOCEL, 6pp
- [3] I.W. Hardie, J.N. aberkow, K.E. Mcconnell, 1984. « A timber harvesting model with variable rotation lengths », For. Sci., 30 : 511-523.
- [4] D.H. Newman, 1988. « The optimal forest rotation : a discussion and annotated bibliography », Gen. Tech. Rep. SE-48, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC.
- [5] R.O. Curtis, 1995. « Extended rotations and culmination age of coast Douglas-fir: old studies speak to current issues », Res. Pap. PNW-RP-485, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. 49 pp.
- [6] K. Hyytiäinen, O. Tahvonen, 2002. « Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures », Scand. J. For. Res., 17 : 274-288.
- [7] J. Ranger, R. Marques, M. Colin-Belgrand, N. Flammang, 1995. « The dynamics and nutrient accumulation in a douglass fir stand studied using a chronosequence approach », Forest ecology and management, 72 : 167-183.
- [8] J. Ranger, C. Nys, 1996. « Biomass and nutrient content of extensively and intensively managed coppice stands, Forestry, 69 : 91-110.
- [9] J.P. Laclau, 2001. « Dynamique du fonctionnement minérale d'une plantation d'eucalyptus : Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquences pour la gestion des plantations industrielles », INRA-Grignon – France.
- [10] W. Walker, A. Baccini, M. Nepstad, N. Horning, D. Knight, E. Braun, A. Bausch. 2011, Field Guide for Forest Biomass and Carbon Estimation, Version 1.0, Woods Hole Research Center, Falmouth, Massachusetts, USA
- [11] 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, Annales de la Recherche Forestière, Maroc, 39 : 185-194.
- [12] M. Boulmane, M. Makhloufi, J.P Bouillet, L. Saint-André, B. Satrani, M. Halim, S. EL Antry-Tazi, 2010. « Estimation du stock de carbone organique dans la chênaie verte du Moyen Atlas marocain ». Acta bot.Gallica, 157(3), 451-467.
- [13] M. Boulmane, I.S. Regina, A. Khia, H. Abaasi, M. Halim, 2013a. « Aboveground Biomass and Nutrient Pools in Two Evergreen 1 Oak Stands of the Middle Moroccan Atlas Area ». Arid Land Research and Management, 27 : 188-202.
- [14] M. Boulmane, I.S. Regina, 2013b, Biomass and organic stocks in the soils : Carbone storage in the oak evergreen forest ecosystems of the Middle and High Moroccan Atlas areas, Edited by Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany. 65p.
- [15] P. Duchaufour, 1970, Précis de pédologie, Paris, Edition Masson.
- [16] 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.
- [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 in 1990 », Forest Research Report, N°158
- [18] C.EP. Cerri, M. Easter, K. Paustian, K. Killian, K. Coleman, M. Bernoux, P. Falloon, D.S. Powlson, N. Batjes, E. Milne, C.C Cerri, 2007. « Predicted soil organic stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030 », Agriculture Ecosystems Environment, 15 : 112-127.
- [19] J. Evans, I.J. Fernandez, L.E. Rustad, S.A. Norton, 2001. « Methods for evaluating fractions in forest soil », Technical Bulletin 178, Maine Agricultural and Forest Experimentation, The University of Maine.
- [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, In : INRA/DPE, Agrigres, 68 pp.
- [21] N.R.S. Cortez, 1996. « Compartimentos e ciclos de nutrientes em plantações de *Eucalyptus globulus* Labill. ssp *globulus* e *Pinus pinaster* Aiton », Ph.D. thesis, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- [22] A. Fabião, M. Madeira, E. Steen, T. Kätterer, C. Ribeiro, C. Araújo, 1995. «Development of root biomass in a *Eucalyptus globulus* plantation under different water and nutrient regimes ». Plant and Soil, 168-169 : 215-223.
- [23] N. Nguyen, A. Bouvet, C. Deleuze, T. Fauconnier, F. Melun, H. Minuzzo, 2001, Bilan des éléments minéraux des plantations clonales d'eucalyptus au sud de la France, Rapport final du Ministère de l'agriculture – France, AFOCEL, 58 pp.
- [24] R.H. Razakamanarivo, Razafindrakoto M.A., Albrech A., 2010. « Fonction puits de carbone des taillis d'eucalyptus à Madagascar ». Bois et Forêts des tropiques, 305 (3) : 5-19.
- [25] P. Duvigneaud, D.S Denayer, 1974. « Le cycle des éléments biogène dans l'écosystème forêt ». Lejeunia, 28 : 16-48
- [26] S. Leonardi, M. Rapp, M. Failla, D. Guarnaccia, C. De Santis, 1995. Chestnut ecosystems function : nutrient cycle processes within several stands in relation to age and altitude on the Etna Volcano. In Sustainability of mediterranean Ecosystems : Case Study of the Chestnut Forest. Brussels : European Commission.
- [27] F. Bernhard-Reversat, J.J. Loumeto, J.P. Laclau, 2001. « Litterfall, Litter Quality and Decomposition Changes with Eucalypt Hybrids and Plantation Age ». In : Bernhard-Reversat F. (éd.). Effect of exotic tree plantations on plant diversity and biological soil fertility in the Congo savanna with special reference to eucalypts. Bogor, Indonésie, Center for International Forestry Research, chapitre 7 : p. 49-56.
- [28] M. Bonneau, 1995, La fertilisation des forêts dans les pays tempérés, Ed ENGREF, 367pp.

[29] D. Paré, P. Rochon, S. Brais, 2002. « Assessing the geochemical balance of managed boreal forests ». *Ecological Indicators*, 1 : 293-311.

[30] A.M. Evans, R.T. Perchel, 2009. « An assessment of biomass harvesting guidelines ». Forest Guild, Santa Fe, NM. 20 p.

[31] L. Charlet, M. Schlegel, 1999. « La capacité d'échange des sols : structure et charges à l'interface eau/particule ». *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 2 : 7-24.

[32] J. Ranger, 2002. « Le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers ». INRA-Nancy.