
Soumis le : 12 Mars 2012

Forme révisée acceptée le : 01 Février 2013

Email de l'auteur correspondant :

boulmanem@yahoo.fr

Biomasse, minéralomasse et éléments nutritifs retournant au sol dans le *Quercus Ilex* du Moyen Atlas Central Marocain

Mohamed BOULMANE^a, Mohamed HALIM^b, Abderrahim KHIA^c, Hayat OUBRAHIM^b, Hassan ABBASSI^b et Abdessamad AMRANI^a

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

^b : Faculty of Sciences Mohamed V, Agdal-Rabat, Morocco

^c : Faculty of Sciences Ibn Tofail, Kénitra, Morocco

Résumé

Les biomasses, les minéralomasses, les retombées de litière et la restitution au sol de bioéléments par leurs intermédiaires ont été étudiés pour deux taillis de chêne vert du Moyen Atlas Central Marocain (Tafachna et Reggada). Les meilleures corrélations et résultats ont été obtenus avec des régressions allométriques de type : $Y(\text{biomasse}) = aX [X = (D^2H)^b]$ avec D et H respectivement diamètre à 1,30 m et hauteur. La biomasse totale sèche de la partie épigée des deux peuplements étudiés est de 96 et 86,4 t.ha⁻¹ respectivement pour Tafachna et Reggada dont la partie ligneuse représente environ 89 %. Les minéralomasses aériennes des cinq éléments majeurs (N, P, K, Ca et Mg) est de 912 kg.ha⁻¹ pour Tafachna et 812 kg.ha⁻¹ pour Reggada. Annuellement, en moyen 10,8 et 8,5 kg.ha⁻¹ de bioéléments sont immobilisés dans la biomasse aérienne respectivement pour Tafachna et Reggada. Les retombées de litière, observées durant trois années consécutives, se situent entre 3,1 et 3,6 t.ha⁻¹.an⁻¹ dont presque 70 % est constitué de feuilles. La restitution au sol des éléments nutritifs par l'intermédiaire de la couverture morte est de 37,9 pour Tafachna et de 44,4 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour Reggada (environ 74 % par l'intermédiaire des feuilles). La décomposition de la litière de feuilles suit une équation exponentielle négative de forme $RF = A + B \exp(-Ct)$. Après deux ans de décomposition des feuilles installée dans des litter-bags, la libération des éléments nutritifs a varié entre 22 % pour le calcium et plus de 80 % pour le potassium.

Mots clés : Biomasse; minéralomasse; litière; bioélément ; décomposition.

Abstract

The biomasses, the minéralomasses, the litterfall and the restitution on the soil of bioelements by their intermediaries are studied for two sites *Quercus ilex* of the Middle Atlas Moroccans (Tafachna and Reggada). The best correlations and results were found with allometric regressions of type: $Y(\text{biomass}) = aX [X = (D^2H)^b]$, D and H are respectively the diameter at 1.30 m and high. The dry total biomass of the epigee part of the two studied settlements is of 96 and 86.4 t.ha⁻¹ respectively for Tafachna and Reggada of which the woody part accounts for approximately 89 %. The air minéralomasses of the five major elements (N, P, K, Ca and Mg) is of 912 kg.ha⁻¹ for Tafachna and 812 kg.ha⁻¹ for Reggada. Annually, 10.8 and 8.5 kg.ha⁻¹ of bioelements are immobilized in the air biomass respectively for Tafachna and Reggada. The litterfall, observed during three consecutive years, range between 3.1 and 3.6 t.ha⁻¹.yr⁻¹ of which almost 70 % consist of leaves. The restitution on the soil of the nutritive elements via the litter is of 37.9 and 44.4 kg.ha⁻¹.yr⁻¹ respectively for Tafachna and Reggada (approximately 74 % via the leaf). The decomposition of the leaves litter follows a negative exponential equation of form $RF = A + B \exp(- Ct)$. After two years of decomposition of the leaves installed in litter-bags, the release of the nutritive elements varied between 22 % for calcium and more than 80 % for potassium.

Keywords: Type your keywords here, separated by semicolons ;

1. Introduction

Le chêne vert est présent sur l'ensemble du bassin méditerranéen, il est particulièrement abondant dans la partie occidentale. Il est réparti d'une manière continue depuis la Tunisie jusqu'à la Turquie, en passant par l'Espagne et son aire de répartition se termine d'une manière discontinue sur les bords de la mer noire. Le chêne vert s'observe également hors de la région méditerranéenne ; dans la région Cantabrique en Espagne, dans la bordure sud-ouest du massif central en France et dans les revers des Alpes en Italie. De même, le chêne vert remonte sur la côte atlantique jusqu'en Bretagne et en Angleterre [1].

Le chêne vert est l'essence forestière la plus répandue au Maroc avec 1 394 000 ha [2]. Il est présent sous tous les bioclimats excepté les zones asylvatiques d'altitude au climat très froid. Il forme de meilleurs peuplements en bioclimats sub-humides et humides. En bioclimat semi aride, les peuplements sont peu denses et peu vigoureux, le chêne vert y apparaît souvent sous forme de matorral plus ou moins dégradé. Le chêne vert joue un rôle très important de point de vue économique, écologique et social. La majorité de la production est utilisée comme bois de feu et de carbonisation. Malgré la superficie importante couverte par cette espèce, elle reste néanmoins parmi les essences autochtones les moins étudiées et plusieurs facteurs de dégradation ont contribué à sa régression : absence quasi-totale de la régénération naturelle par glands ou par rejet de souches, exploitations abusives et surpâturage. Par ailleurs, l'absence d'outils scientifiques performants pour évaluer la ressource, complique davantage la gestion de ces peuplements.

La gestion durable des écosystèmes forestiers nécessite de pouvoir mettre en regard des stocks d'éléments minéraux du sol, ceux définitivement incorporés dans la biomasse (incorporation minérale), les prélèvements au sol des peuplements (incorporation minérale + retours par litières + récréation + variation de la minéralomasse des racines fines et des feuilles) et leurs besoins (prélèvements au sol + transferts internes) [3, 4].

La litière de surface joue un rôle fondamental dans le retour des éléments nutritifs et dans le transfert de l'énergie entre les plantes et le sol. C'est particulièrement, un important réservoir des éléments nutritifs des écosystèmes forestiers posant sur des sols pauvres, où la végétation dépend d'une grande part du recyclage des éléments nutritifs [5]. Le retour des éléments nutritifs au sol par l'intermédiaire de la litière a été étudié dans la région méditerranéenne ; en France [6, 7], en Espagne [8, 9, 10], au Portugal [11] et en Turquie [12]. Au Maroc, peu de recherches ont été menées. Les rares données existent

dans le domaine de fonctionnement des écosystèmes forestiers concernent essentiellement le genévrier [13, 14, 15, 16] et le chêne liège [17, 18]. La décomposition de litière est une voie importante pour fournir les éléments nutritifs pour le processus de recyclage et le contrôle du retour des éléments nutritifs à l'écosystème. Le taux de libération des éléments dépend de plusieurs facteurs : la composition chimique de la litière [19, 20, 21], la nature structurale des éléments nutritifs dans la litière [22], la disponibilité des sources exogènes d'éléments nutritifs [12], les variables Macro et microclimatique [23] et l'activité biotique microbienne et faunique [24].

Les principaux bénéfices de la gestion durable des écosystèmes forestiers sont l'amélioration dans le changement climatique global, l'augmentation ou au moins la préservation de la séquestration du carbone dans les sols, l'amélioration de la biodiversité et de la qualité de l'environnement (air et eau), la diminution de la dégradation des sols....

Les objectifs de la présente étude sont de fournir les éléments nécessaires à une gestion raisonnée de cet écosystème à savoir:

- l'estimation de la biomasse et de la minéralomasse des éléments nutritifs majeurs [Azote (N), Phosphore (P), Potassium (K), Calcium (Ca), Magnésium (Mg) et le Sodium (Na)] et leur répartition dans les différentes composantes épigées de l'arbre,
- l'étude des retours de matière (chutes de litière) et la libération des éléments minéraux qui en découle et le rapprochement de ces résultats avec les besoins des arbres en éléments nutritifs et la richesse minérale des sols,
- la détermination de certains flux des cycles biogéochimiques des éléments nutritifs (translocation, transfert et absorption).

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

Pour mener cette étude, deux parcelles d'un hectare chacune ont été choisies dans les ilôts du Moyen Atlas Central Marocain ; l'un près de Khénifra (Tafachna à une altitude de 1670 m) et l'autre près d'Imouzzer Kander (Reggada à une altitude de 1450 m). D'après l'analyse des cernes des carottes prélevées à la tarière à la base d'arbres dominants dans les deux parcelles, l'âge des deux peuplements est estimé de 65 ans pour Tafachna et de 70 ans pour Reggada. Les deux peuplements n'ont jamais fait l'objet d'aménagement. Certaines caractéristiques de ces deux parcelles sont illustrées dans le tableau 1.

Tableau 1

Principales caractéristiques des deux parcelles.

Parcelle	Nbre de brins/ha	Nbre de pieds/ha	Surface terrière (m ² .ha ⁻¹)	Hauteur dom. (m)	C _{1,30} moy. (m)	Hauteur moy. (m)	Substrat	Pente moy. (%)
Reggada	1824	1584	19,3	6,1	37,1	4,5	calcaire	5
Tafachna	5252	5192	29,8	6,3	25,3	4,3	dolomite	10

Avec : moy. = moyenne, dom. = dominante et Nbre = Nombre.

2.2. Prélèvements et analyses physico-chimiques des échantillons de sols

Les échantillons de sols ont été prélevés à partir de cinq couches (0-15, 15-30, 30-50, 50-70 et 70-100 cm). Comme le sol est rocheux, on s'est limité à cinq profils de prélèvements pour chaque parcelle (4 au sommet et un au milieu de la parcelle). Après séchage à 65 °C, broyage et tamisage à 2 mm, les échantillons de sols ont été analysés conformément aux méthodes décrites par Duchaufour [25]. Ce sont principalement la mesure du pH, l'analyse

granulométrique par la méthode de la pépite de Robinson, le dosage du phosphore assimilable par la méthode d'Olson, la détermination de la teneur en carbone organique par la méthode de Walkey-Black, le dosage d'azote total en utilisant la méthode de distillation Kjeldahl : Buchi 323, la détermination de la teneur des bases échangeables par la méthode d'acétate d'ammonium à pH 7 et la détermination de la teneur en calcaire par calcimétrie. Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons de sols sont regroupés dans le tableau 2.

Tableau 2

Propriétés physico-chimiques de sols à différentes profondeurs

Pr. (cm)	Tafachna					Reggada				
	0-15	15-30	30-50	50-70	70-100	0-15	15-30	30-50	50-70	70-100
pH	7,4	7,5	7,7	7,8	7,8	7,2	7,3	7,3	7,4	7,3
% C	4,9	1,71	0,72	0,23	0,01	2,1	0,96	0,21	0,05	0,01
% M.O	8,48	2,96	1,25	0,4	0,017	3,63	1,66	0,363	0,086	0,017
% N	1,5	0,42	0,176	0,054	0,002	0,84	0,27	0,052	0,012	0,002
C/N	32,7	40,7	41,0	42,6	41,7	25,0	35,6	40,4	41,7	41,7
% CaCO ₃	15,4	14,6	20,2	19,7	24,3	4,2	4,9	4,6	7,3	6,8
% Ca	2,22	2,94	3,06	3,4	3,6	1,9	2,2	2,14	2,61	2,45
% Mg	0,45	0,4	0,35	0,41	0,33	1,23	1,12	1,48	1,65	1,79
% P	0,9	0,26	0,12	0,04	0,002	0,4	0,18	0,09	0,03	0,002
% K	1,5	0,7	0,25	0,2	0,15	0,75	0,5	0,25	0,25	0,15
da	1,28	1,34	1,39	1,42	1,45	1,32	1,37	1,41	1,40	1,42
% F.F	56	30	35	28	24	79,9	70,8	69,0	67,0	56,0
% A	18,6	17,2	20,4	21,3	18,9	29,1	31,7	27,2	28,9	32,7
% L	53,9	58,6	56,1	58,7	62,2	47,2	49,3	50,1	45,3	47,1
% S	27,5	24,2	23,5	20,0	18,9	23,7	19,0	22,7	25,8	20,2

Pr. : Profondeur ; da : Densité apparente ; % F.F : Pourcentage de la fraction fine (< 2 mm) ; A : Argile ; L : Limon ; S : Sable et M.O : Matière Organique.

2.3. Opérations effectuées pour estimer la biomasse aérienne

Inventaire exhaustif qui consiste à mesurer les circonférences à 1,30 m de tous les arbres. Il permettra l'étude de la structure diamétrique des peuplements, définir les arbres à abattre et l'estimation de la biomasse et de la minéralomasse sur l'ensemble du peuplement. Vingt arbres représentatifs des différentes classes de circonférences à 1,30 m (figure 1) ont été abattus dans chaque parcelle pour la détermination de la biomasse et de la minéralomasse. Les deux peuplements présentent une structure régulière, le mode est situé dans la classe de 20 cm de circonférence pour Tafachna et dans la classe de 30 cm pour Reggada.

La détermination de la biomasse des différentes composantes de l'arbre (bois du tronc, écorce du tronc,

branches, rameaux et feuilles) est faite par la méthode directe qui consiste à abattre un échantillon de 20 arbres choisis dans différentes classes de surface terrière. Le tronc, les branches, les rameaux et les feuilles sont séparés et pesés sur place

Bois et écorce : Une fois l'arbre est abattu, on prélève une rondelle de 2 cm d'épaisseur à chaque mètre du tronc. Au laboratoire, les rondelles sont repesées, décorcées afin de déterminer le pourcentage de chaque compartiment (bois du tronc et écorce du tronc) et séchées séparément pour déterminer leurs taux d'humidité.

Branches : Trois branches par niveau (bas, milieu, haut du houppier) sont sélectionnées. Pour chaque branche, nous avons découpé trois rondelles d'égale épaisseur (environ 2 cm, en bas, au milieu et en haut de la branche). Les rameaux et feuilles de chaque branche sont prélevés du bas, du milieu et du haut. L'ensemble est bien

mélangé, puis, deux poignées de chaque compartiment sont mises des sacs en plastique.

Les différents échantillons (bois du tronc, écorce du tronc, branches, rameaux et feuilles) sont conservés au frais, dans des sacs en plastique bien fermés (dont on connaît le poids) et pesées. Les échantillons sont ramenés rapidement au laboratoire où ils sont repesés, séchés à 65 °C jusqu'au poids constant puis repesés. Pour les rondelles du bois du tronc et des branches, on a procédé au découpage des anglocentres d'angle constant, pour constituer un échantillon composite.

Vingt arbres par parcelle sont abattus, chacun des arbres a fourni au moins 5 rondelles du tronc (divisées en bois et écorce), 9 rondelles des branches, un échantillon des rameaux et une aliquote des feuilles ; soit environ 420

échantillons de foliaire par parcelle. Après séchage et broyage, les teneurs en éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca et Mg), dans la végétation aérienne ainsi que dans la litière ont été déterminée par calcination et les résultats sont exprimés en poids sec.

L'ajustement des modèles pour l'estimation de la biomasse répartie dans les différentes composantes de l'arbre, est effectué par la méthode de régression à l'aide du logiciel SAS (Proc reg, proc nlin, proc model), le jeu complet d'équations (pour les différents compartiments) est obtenu en suivant la méthode décrite par Saint-André et Picard [26]. Les modèles testés sont de type linéaires en D^2H avec ou sans intercept et non linéaires en D^2H et en $C1,30$ avec ou sans intercept.

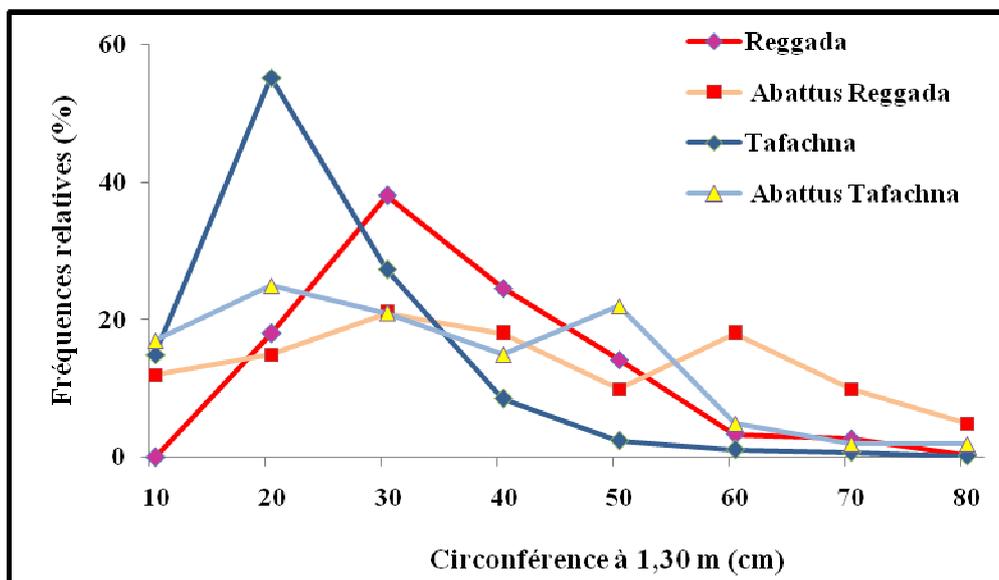


Figure 1. Structure du peuplement et des arbres abattus.

2.4. Biomasse et minéralomasse de la litière

Pour l'estimation de la biomasse de la litière, une vingtaine quadrat carré de 1 m² chacun espacé de 10 m l'un de l'autre ont été installés aléatoirement à l'intérieur de chaque parcelle selon des transects. Puis, la litière se trouvant dans chaque quadrat est collectée mensuellement. Les feuilles, les rameaux et les fruits sont séparés et pesés sur place et des échantillons sont amenés au laboratoire des analyses physico-chimique du CRF-Rabat pour déterminer leur taux d'humidité et les teneurs en éléments nutritifs.

2.5. Dynamique de la décomposition de la litière

La dynamique de décomposition de la litière (biomasse et minéralomasse) a été étudiée par l'approche de l'installation dans chaque parcelle de 24 sacs de litière en

nylon de maille 1 mm², contenant chacun 50 g de feuilles fraîchement tombées et séchées. Les sacs de litière ont été attachés avec des fils de nylon pour empêcher leurs mouvements et assurer leurs contacts avec la couche de la litière. Trois endroits ont été choisis dans chaque parcelle pour respecter l'hétérogénéité spatiale des peuplements obtenue à l'aide de l'inventaire. La récolte des sacs de litière se fait tous les 3 mois à raison de 3 sachets par parcelle. L'expérimentation a commencé en Janvier 2006 et s'est étalée sur 2 ans. Les échantillons récupérés des sacs de litière ont été séchés à 65 °C jusqu'à poids constant et analysés. Les résultats (biomasse et minéralomasse) sont exprimés en kg. ha⁻¹.an⁻¹.

2.6. Analyse chimique de la biomasse foliaire

Les échantillons végétaux sont séchés à l'étuve à 65 °C, broyés et homogénéisés. La teneur en azote est déterminée par titrimétrie par HCl N/70 après

minéralisation de type Kjeldahl modifié [acide sulfurique (H_2SO_4) + catalyseur (Se)]. La minéralisation par l'eau régale (7,5 ml de HCl + 2,5 ml de HNO_3), permet la détermination de la teneur en Ca, Mg et K par spectrophotométrie atomique à flamme (GBC 906AA) et la teneur en P par colorimétrie du complexe phosphovanadomolybdique.

3. Résultats et discussion

3.1. Biomasse et minéralomasse dans la partie aérienne

Biomasse aérienne : La figure 2 représente l'évolution de la biomasse totale et des différentes composantes (bois, écorce, écorce, tronc (bois + écorce), branches, rameaux et feuilles), pour les vingt arbres abattus pour chaque parcelle, en fonction de D^2H . Les équations de régressions déterminées pour la biomasse totale et la biomasse des différentes composantes de l'arbre en fonction de D^2H , pour les deux parcelles, sont regroupées dans le tableau 3.

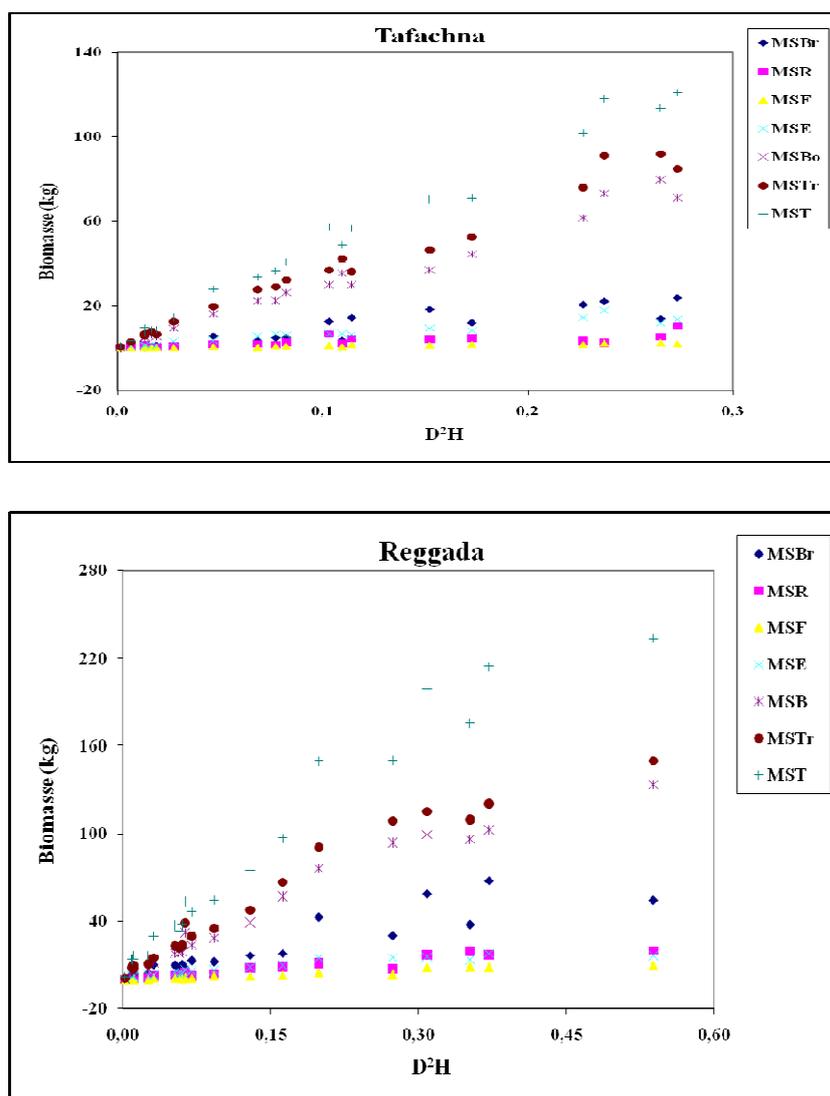


Figure 2. Biomasse totale et des différentes composantes des arbres abattus en fonction de D^2H . Avec, D : Diamètre à 1,30 m et H : Hauteur de l'arbre, D et H sont donnés en m.

Tableau 3

Modèles de la biomasse des différentes composantes de l'arbre de Tafachna et Reggada

	Tafachna		Reggada	
	Modules ajustés	R ²	Modules ajustés	R ²
Bois	MSBo = 264.(D ² H) ^{0,6}	0,96	MSBo = 230.(D ² H) ^{0,6}	0,95
Ecorce	MSE = 41.(D ² H)	0,98	MSE = 27.(D ² H) ^{0,8}	0,98
Tronc	MSTr = 302.(D ² H)	0,97	MSTr = 255.(D ² H) ^{0,8}	0,96
Branches	MSBr = 75.(D ² H)	0,95	MSBr = 108.(D ² H)	0,98
Rameaux	MSR = 15.(D ² H)	0,98	MSR = 36.(D ² H) ^{0,8}	0,96
Feuilles	MSF = 7,1.(D ² H)	0,96	MSF = 19.(D ² H)	0,97
Total	MSTo = 396.(D ² H) ^{0,9}	0,97	MSTo = 416.(D ² H) ^{0,8}	0,96

MSE, MSBo, MSTr, MSBr, MSR, MSF, MSTo : Masses sèches de l'écorce, du bois, du tronc (bois + écorce), des branches, des rameaux, des feuilles et totale. Les masses sont exprimées en kg de matière sèche

Les résultats, obtenus à partir des équations de régressions, de la biomasse totale et sa répartition dans les différents compartiments sont regroupés dans la figure 3. Ces résultats sont exprimés en t MS.ha⁻¹ (MS : Matière Sèche).

La biomasse totale sèche de la partie érigée des deux peuplements étudiés est de 96 et 86,4 t.ha⁻¹ respectivement pour Tafachna et Reggada dont les composantes pérennes (tronc et branches) représentent environ 89 % de la biomasse totale. Comparativement aux résultats obtenus dans d'autres chênaies vertes du pays : entre 20,6 et 42 au Moyen Atlas central [27], 24,9 t.ha⁻¹ à Aït Hatem-Oulmes [28], les forêts de Tafachna et Reggada sont d'une production meilleure.

Respectivement, pour ces deux parcelles d'étude la productivité moyenne est de l'ordre de 1,48 et 1,33 t.ha⁻¹.an⁻¹. Ainsi, la production ligneuse annuelle moyenne est de 1,32 pour Tafachna et 1,1 t.ha⁻¹ pour Reggada. Dans ces taillis, la production annuelle en biomasse est relativement faible si l'on compare aux peuplements classiques traités en taillis en France pour lesquels la production annuelle en biomasse dépasse 7 t.ha⁻¹.an⁻¹ (cas des taillis de châtaignier) [29].

Stock en éléments nutritifs majeurs dans la partie aérienne. Les teneurs et les quantités des cinq éléments majeurs N, P, K, Ca et Mg dans les différentes composantes de l'arbre, des deux parcelles Tafachna et Reggada, sont regroupées dans le tableau 4.

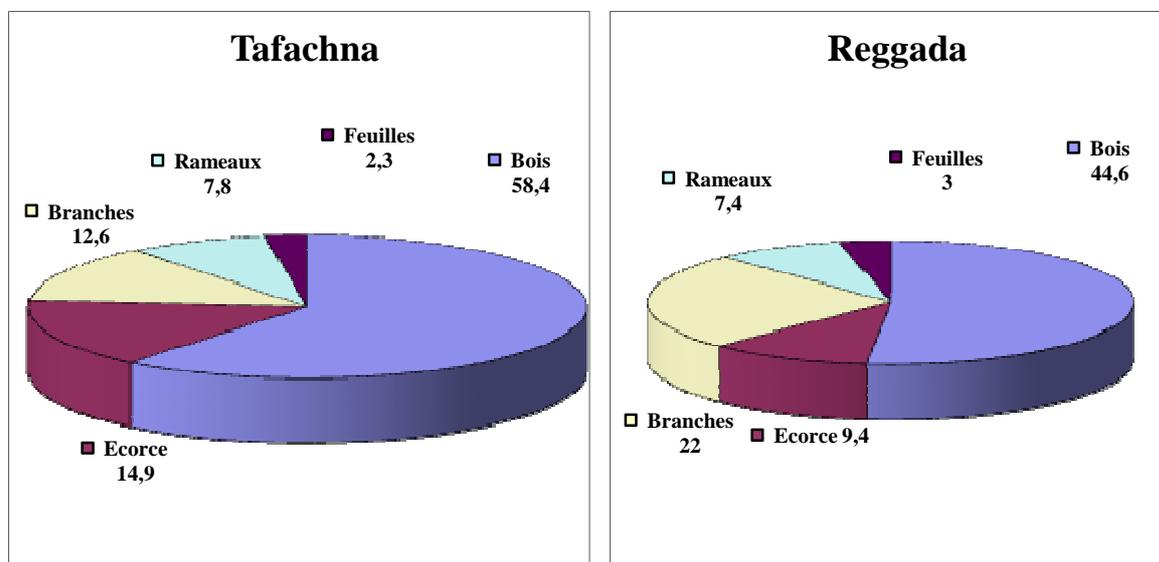


Figure 3. Répartition de la biomasse (t.ha-1) dans les différentes composantes de l'arbre.

Tableau 4

Concentrations et stocks moyens en bioéléments dans les différentes composantes aériennes.

		Concentration moyenne (mg.kg ⁻¹ MS)					Total	Stock en bioéléments (kg.ha ⁻¹)					Total
		N	P	K	Ca	Mg		N	P	K	Ca	Mg	
Taf.	Bois	1931	402	523	1166	536	4558	112,8	23,5	30,5	68,1	31,3	266,2
	Ecorce	1830	468	373	16848	1058	20557	27,3	7,0	5,6	251,0	15,8	306,6
	Branches	4286	1097	1356	2282	1478	10499	54,0	13,8	17,1	28,8	18,6	132,3
	Rameaux	9316	1257	2692	2085	2095	17445	72,7	9,8	21,0	16,3	16,3	136,1
	Feuilles	18373	3519	3177	3496	2523	31088	42,3	8,1	7,3	8,0	5,8	71,5
	Total						309,2	62,2	81,5	372,2	87,8	912,7	
Reg.	Bois	1952	460	428	750	1147	4737	87,1	20,5	19,1	33,5	51,2	211,3
	Ecorce	1884	466	394	12728	2358	17830	17,7	4,4	3,7	119,6	22,2	167,6
	Branches	4218	1089	1359	1572	1788	10026	92,8	24,0	29,9	34,6	39,3	220,6
	Rameaux	8388	1294	2799	1708	2063	16252	62,1	9,6	20,7	12,6	15,3	120,3
	Feuilles	17857	3394	3394	3245	3240	31130	53,6	10,2	9,4	9,7	9,7	92,6
	Total						313,2	68,2	82,8	210,1	137,6	812,4	

Taf. : Tafachna et Reg. : Reggada

Par compartiment, ce sont les feuilles et les rameaux, les organes les plus jeunes des arbres, qui présentent les concentrations les plus élevées (sauf pour la concentration du calcium qui est importante dans le cas de l'écorce du tronc à Tafachna et la concentration du calcium et du magnésium qui sont élevées dans l'écorce du tronc à Reggada). Alors que, le bois du tronc est l'organe qui présente les concentrations les plus faibles en éléments nutritifs. Le classement des compartiments en fonction de leur concentration en éléments nutritifs considérés est le suivant : Feuilles > Ecorce du tronc > Rameaux > Branches > Bois du tronc.

Le tableau 4 regroupe également les quantités des éléments nutritifs majeurs séquestrés dans les différentes composantes de l'arbre. Ces quantités ont été calculées en multipliant la teneur de chaque élément par la biomasse du compartiment considéré. Les résultats présentés dans ce tableau montrent que la minéralomasse totale, des cinq éléments majeurs (N, P, K, Ca et Mg), dans la partie aérienne est respectivement 912,7 pour Tafachna et 812,4 kg.ha⁻¹ pour Reggada. L'azote et le calcium viennent en tête suivie du magnésium, du potassium et du phosphore. On retrouve en particulier l'importance des petits compartiments de biomasse, telles que les feuilles, les rameaux et les branches, dans la fixation de bioéléments. Par exemple :

-les feuilles représentent de 2,4 à 3,5 % de la biomasse épiquée et fixent de 7,8 à 11,4 % d'éléments nutritifs ;

- les rameaux représentent de 8,1 à 8,6 % de la biomasse aérienne et immobilisent environ 15 % des cinq éléments majeurs ;

- les branches représentent de 13,1 à 25,4 % de la biomasse et contiennent de 15 à 27 % de bioéléments ;

- par contre, le bois de tronc qui représente de 51,6 à 60,8 % de la biomasse n'immobilise qu'entre 26 et 29,1 % d'éléments nutritifs ;

On note la très forte minéralisation de l'écorce des taillis de chêne vert puisque les 10,9 à 15,5 % de la matière sèche qu'elle représente immobilisent de 20,6 à 33,5 % de bioéléments dont le calcium représente plus de 72 %.

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 et branches) par sa composition chimique moyenne, telle qu'elle a été définie par Duvigneaud et Denayer [30], Lemee [31] et Leonardi et al., [32]. Ceci permet d'évaluer les immobilisations annuelles moyennes des éléments nutritifs majeurs en (tableau 5).

Pour l'ensemble des cinq éléments analysés, l'immobilisation annuelle est de 10,8 kg.ha⁻¹ pour Tafachna et 8,6 kg.ha⁻¹ pour Reggada dont les productions ligneuses sont respectivement 85,9 et 76 t.ha⁻¹.

Tableau 5

Immobilisation annuelle de bioéléments (kg.ha⁻¹.an⁻¹) dans la biomasse épiquée à Tafachna et Reggada

	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium	Total
Tafachna	2,98	0,81	0,68	5,35	1,01	10,83
Reggada	2,82	0,75	0,7	2,68	1,61	8,56

3.2. Biomasse et minéralomasse et décomposition de la litière

Production de la biomasse en litière : La figure 4 donne le rythme et les valeurs des retombées mensuelles de la litière totale et ses fractions (feuilles, bois et glands). On constate qu'il y a une forte variabilité mensuelle et inter-annuelle. Pour cette espèce à feuilles persistantes, les retombées de litières s'étalent sur toute l'année, avec un optimum d'Avril à Mai, le maximum absolu se situant chaque année en Avril. Pendant ces deux mois, on note une chute importante de feuilles ; les glands tombent plus tard, en fin d'été et en automne. Makhloufi et *al.*, [33] indiquent un maximum de retombée de litière en Avril et Mai pour la forêt des iliaies du Moyen Atlas et Rapp [34] le situe en Avril - Juin pour le chêne vert en France.

Si les feuilles sont responsables de ce rythme mensuel régulier, les chutes de bois, provoquées souvent par des facteurs météorologiques, sont responsables de certaines irrégularités d'une année à l'autre. Même sans intervention de tels facteurs, le dispositif de collecte en lui-même, peut causer des anomalies lorsqu'une branche tombe dans un quadrat. Les retombées de Juillet-Août des trois années (2006, 2007 et 2008) peuvent s'expliquer par ces facteurs météorologiques (tempête). A cette périodicité mensuelle se superpose un cycle bisannuel qui se manifeste par une production plus importante des feuilles une année sur deux (figure 4).

Les feuilles ont une durée de vie de deux ans en moyenne, certaines peuvent en atteindre trois ans. Les chutes de litière sont de 3,10 pour Tafachna et de 3,56 t.ha⁻¹.an⁻¹ pour Reggada (tableau 6) dont plus de 70 % est constitué de feuilles et les glands représentent moins de 2,7 %.

Restitution au sol de bioéléments par l'intermédiaire de la litière : Dans le tableau 7, nous avons regroupés la composition chimique et la production moyennes obtenues pour les cinq éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca et Mg) dans la litière totale et ses trois fractions dans les deux stations d'études. On constate, qu'il y a une différence très nette en composition chimique entre les deux forêts. Les litières de Tafachna sont plus riches en azote, calcium et en potassium ; alors que, celles de Reggada sont riches en azote, magnésium et en calcium. Cette différence de concentration en calcium et en magnésium entre les deux parcelles peut s'expliquer par la nature du substrat édaphique et la disponibilité variable en éléments biogènes. Le sol de Tafachna est très riche en calcite alors que celui de Reggada est dolomitique.

La production moyenne annuelle de litière en bioéléments est de 37,9 et 44,4 kg.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement pour les deux parcelles Tafachna et Reggada (tableau 7).

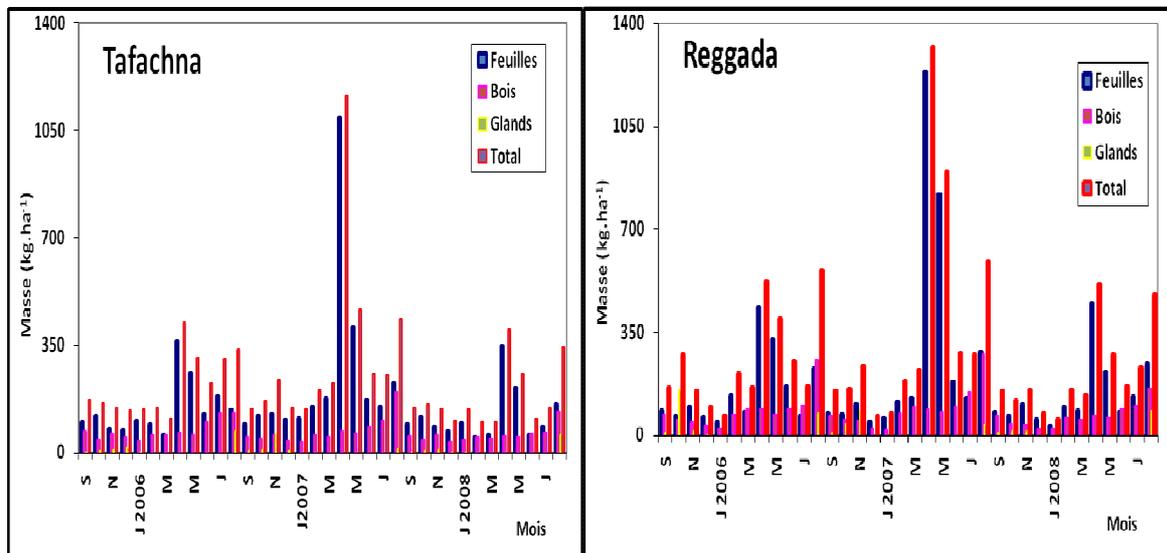


Figure 4. Variations mensuelles des retombées des différentes fractions de la litière du chêne vert de Tafachna et Reggada.

Tableau 6

Production moyenne (t.ha⁻¹.an⁻¹) de la litière totale et ses fractions.

Fraction litière	Tafachna				Reggada			
	Feuilles	Bois	Glands	Totale	Feuilles	Bois	Glands	Totale
Production Moyenne	2,25	0,77	0,08	3,10	2,47	0,96	0,14	3,56

Tableau 7

Composition chimique moyenne et la production moyenne annuelle de la matière sèche des fractions de la litière obtenues pour les deux parcelles.

	Parcelles	Fractions	N	P	K	Ca	Mg	Total
Composition chimique moyenne (g.kg ⁻¹ MS)	Tafachna	Feuilles	7,80	0,90	1,20	1,60	0,90	12,40
		Bois	5,85	0,89	0,93	1,68	1,15	10,50
		Glands	7,20	0,58	0,62	0,92	0,72	10,04
	Reggada	Feuilles	8,40	0,90	1,20	1,30	1,50	13,30
		Bois	6,21	0,92	0,86	1,20	1,77	10,96
		Glands	7,30	0,62	0,58	0,61	1,03	10,14
Production moyenne annuelle (kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Tafachna	Feuilles	17,55	2,20	2,70	3,60	2,02	27,89
		Bois	5,12	0,78	0,81	1,47	1,00	9,19
		Glands	0,57	0,05	0,05	0,07	0,06	0,80
		Litière totale	23,24	2,85	3,56	5,14	3,08	37,88
	Reggada	Feuilles	20,71	2,22	2,96	3,21	3,71	32,85
		Bois	5,78	0,86	0,80	1,11	1,65	10,20
		Glands	0,94	0,08	0,08	0,08	0,13	1,31
		Litière totale	27,47	3,16	3,84	4,39	5,49	44,36

Plus de 74 % des cinq éléments nutritifs majeurs est produit par les feuilles et moins de 3 % sont fournis par les glands.

Individuellement l'azote est l'élément nutritif le plus abondant dans la litière (plus de 61 % de la minéralomasse), suivi du calcium pour Tafachna (13,60 %) et du magnésium pour Reggada (12,38 %). La quantité de potassium est de 3,56 et de 3,84 kg.ha⁻¹.an⁻¹ et celle du phosphore de 2,85 et de 3,16 kg.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement pour Tafachna et Reggada. L'étude de la production en éléments nutritifs par l'intermédiaire de la litière permet d'établir une série de successions pour la litière totale et ses différentes fractions.

	Tafachna	Reggada
Feuilles	N > Ca > K > P > Mg	N > Mg > Ca > K > P
Bois	N > Ca > Mg > K > P	N > Mg > Ca > P > K
Glands	N > Ca > Mg > K = P	N > Mg > P = Ca = K
Litière	N > Ca > K > Mg > P	N > Mg > Ca > K > P

Ces successions montrent l'importance de chaque élément nutritif dans le cycle biogéochimique pour les deux parcelles d'études. Pris séparément, l'azote vient toujours en tête suivi du calcium pour Tafachna et du magnésium pour Reggada puis les autres éléments.

Décomposition de la litière : Les différents échantillons de feuilles des deux parcelles, mis en décomposition dans

des sachets (litter-bag) durant deux années consécutives, indiquent une similitude du processus quantitatif de décomposition (figure 5).

Ce processus de décomposition peut être représenté par une courbe exponentielle négative répondant à l'équation :

$$RF = A + B \exp(-Ct)$$

- RF : Reste des feuilles non décomposé,
- A : Fraction initiale de la matière organique difficilement décomposable,
- B : Fraction de faible stabilité,
- C : Constante de décomposition,
- Et, t : Période de décomposition.

Pour Tafachna : RF = 4,7 + 45,24exp(-0,0028j) ; avec R² = 0,96

Pour Reggada : RF = 4,86 + 45,14exp(-0,0035j) ; avec R² = 0,97

Le reste de masse de litière feuille (RF) a significativement corrélée (r² < 0,97 et p < 0,05) avec le temps en jour (figure 5). Ce suivie a montré que les modèles de décomposition des feuilles sont semblables pour les deux parcelles de chêne vert, mais se produit à différent taux de décomposition. Ceci peut être expliqué par la différence en densité de peuplement (Tafachna 5192 pieds.ha⁻¹ et Reggada 1584 pieds.ha⁻¹). Un modèle semblable RF = A + Bexp(-Ct) a été employé par Regina [9], Berg et Lundmark [35], Qingkui et al., [36], Lechmere et al., [37] et Regina et al., [38].

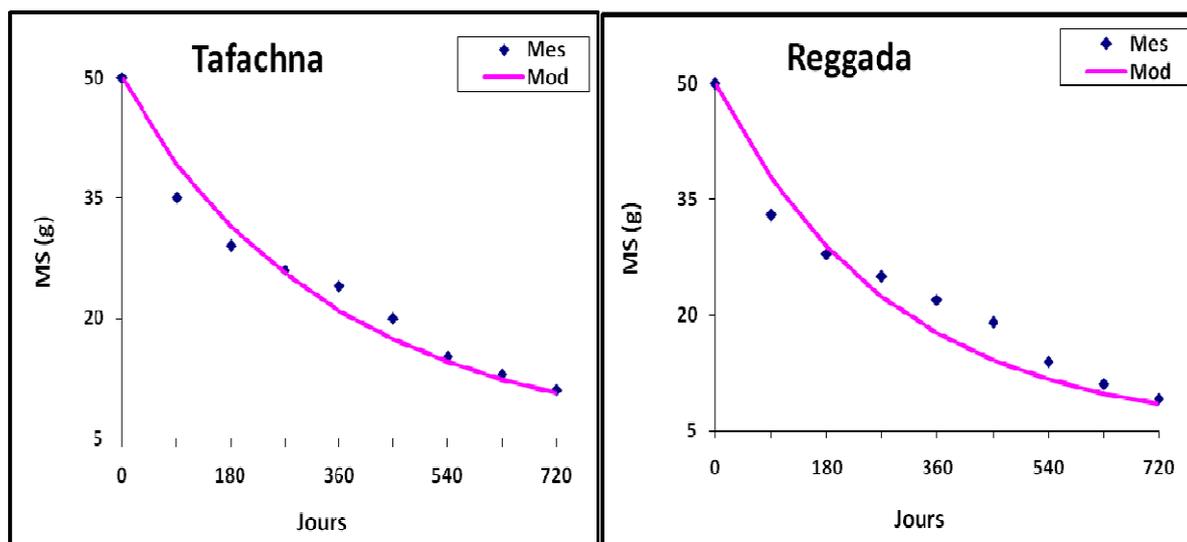


Figure 5. Perte de masse sèche des feuilles pendant les deux ans de décomposition.

Mes : mesurée et Mod : modélée

A partir de ces équations, on peut estimer pour chacune des deux parcelles, le stock de litière restant au sol, une et deux années après leur chute, ainsi que les quantités disparues. Connaissant la composition chimique des feuilles après un an et deux ans de décomposition (tableau 8), on peut alors évaluer les quantités et les pourcentages de bioéléments libérés au bout d'une et deux années de décomposition de la litière accumulée à la surface du sol.

La plus forte libération des quatre éléments (azote, phosphore, potassium et magnésium) s'est produite pendant la première année de décomposition. Après les concentrations de ces quatre éléments demeurent constantes sauf pour l'azote. Les pourcentages des

quantités restantes de K, après deux ans de décomposition, sont de 19 % pour Tafachna et 13 % pour Reggada (tableau 8).

Toutes les études publiées montrent une libération semblable en potassium [39, 40].

Contrairement à l'azote et le phosphore, le potassium n'est pas lié comme composante structurale dans les plantes mais, il est fortement hydrosoluble [41]. Dans les deux parcelles, plus de 80 % de la quantité initiale de potassium a été libéré pendant la première année de décomposition. Ceci est en accord avec l'abondance et la solubilité de ce bioélément. Les pertes très faibles de K en décomposition pendant la deuxième année ont été attribuées selon Berg et Staaf [21] à la rétention en K pour accomplir les besoins des décomposeurs.

Tableau 8
Variation du stock de litière et de bioéléments dans les feuilles en décomposition.

	Parcelles	Type de litière	Q. Litière restante	Q. Lit. décomposée	N	P	K	Ca	Mg
Composition chimique (mg.g ⁻¹)	Tafachna	Initial	2250	0	7,8	0,9	1,2	1,6	0,9
		1 ^{ère} année	1080	1170	12,8	1,2	0,5	3,2	0,7
		2 ^{ème} année	495	585	20,6	2,4	1,1	5,7	1,6
	Reggada	Initial	2470	0	8,4	0,9	1,2	1,3	1,5
		1 ^{ère} année	1087	1383	13,3	1,3	0,5	2,9	1,4
		2 ^{ème} année	455	632	23,1	2,6	0,9	5,5	3,1
Quantité d'éléments libérés (kg.ha ⁻¹)	Tafachna	Apport initial	2250	0	17,55	2,02	2,7	3,6	2,02
		Libérée 1 ^{ère} année	1080	1170	3,73	0,72	2,16	0,14	1,26
		Libérée 2 ^{ème} année	495	585	3,62	0,11	-	0,64	0,07
	Reggada	Total libérée		1755	7,35	0,83	2,16	0,78	1,33
		Apport initial	2470	2470	20,75	2,22	2,96	3,21	3,71
		Libérée 1 ^{ère} année	1087	1383	6,29	0,81	2,42	0,06	2,19
	Libérée 2 ^{ème} année	455	632	3,95	0,23	0,13	0,65	0,11	
	Total libérée		2015	10,24	1,04	2,55	0,71	2,30	
	% d'éléments libérés	Tafachna	Initial	100	0	100	100	100	100
% 1 ^{ère} année			48	52	21,25	35,64	80	3,89	62,38
% 2 ^{ème} année			22	26	20,63	5,44	-	17,78	3,46
% Total				78	41,88	41,08	80	21,67	65,84
		Initial	100	0	100	100	100	100	100

	% 1 ^{ère} année	44	56	30,31	36,47	81,76	1,87	59,03
Reggada	% 2 ^{ème} année	18,4	25,6	19,04	10,36	4,39	20,25	2,96
	% Total		81,6	49,35	46,83	86,15	22,12	62,99

Comme indiqué dans le tableau 8, après accumulation relative pendant la première année dans les sacs de litière, le calcium a montré des taux faibles de diminution par rapport aux autres éléments nutritifs. Après deux ans de décomposition, 87 % à Tafachna et 77 % à Reggada de la quantité du calcium initial dans les parcelles reste toujours. Ceci pourrait résulter de l'association du calcium avec les composés résistants tels que la cellulose et la lignine [42].

3.3. Bilan annuel de la circulation des éléments étudiés

Le tableau 9 résume l'ensemble des valeurs pondérales, pour les cinq bioéléments étudiés, dans les différents compartiments de la phytocénose épicéenne et des flux entre la phytocénose et le sol ou l'atmosphère dans les deux peuplements des taillis de chêne vert du Moyen Atlas.

Tableau 9
Bilan de circulation des cinq bioéléments étudiés

		Tafachna	Reggada
Minéralomasse (kg.ha ⁻¹)	Feuilles	71,50	92,60
	Bois	705,10	601,20
Retombée de litière (kg.ha ⁻¹)	Feuilles	27,89	32,85
	Autres	09,99	11,51

A partir de ces valeurs, on a également calculé :

- 1- Les **translocations** de bioéléments des feuilles vers le bois (minéralomasse des feuilles de l'arbre – teneur en éléments nutritifs de la fraction litière de feuilles).
- 2- Les **transferts** des organes de réserve vers les nouvelles feuilles (translocation – bioéléments immobilisés dans l'incrément de matériel pérenne). Dans le cas étudié, l'estimation de ce paramètre est limitée. En effet, vu l'absence de données concernant la biomasse et la minéralomasse racinaire, on ne connaît pas la fixation sur les organes souterrains. En

réalité les transferts seront donc inférieurs aux valeurs établies uniquement sur la partie épicéenne des taillis.

- 3- L'**absorption** de nutriments correspond selon la définition de Ranger [4] aux éléments restitués au sol par l'intermédiaire des litières et aux éléments immobilisés par l'incrément annuel de biomasse pérenne.
- 4- Le **taux de Rotation** ou de recyclage est le pourcentage d'éléments restitués au sol par l'intermédiaire des litières en fonction de leur absorption.

Comme pour les transferts, les résultats obtenus concernant l'absorption et le taux de rotation ne tiennent pas compte de la participation des organes souterrains à la gestion des bioéléments. Les valeurs respectives de ces quatre paramètres pour les cinq éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca et Mg) sont regroupées dans le tableau 10.

Les valeurs de translocations sont positives ce qui montre que les translocations sont toujours supérieures à l'immobilisation dans le bois de l'année [44]. L'étude des flux des taillis de chêne vert au moyen Atlas marocain montre :

- Le coefficient de rotation (éléments dans les chutes de litière x 100/éléments nutritifs dans la biomasse) est élevé pour tous les éléments nutritifs sauf pour le calcium à Tafachna et le magnésium à Reggada.
- les transferts internes d'éléments des parties âgées vers les organes en croissance est souvent du même ordre de grandeur que celui du prélèvement au sol pour NPK.
- les restitutions par les litières et la mortalité diminuent très nettement les pertes absolues du sol ; le recyclage par la minéralisation de litières représente un processus majeurs de recyclage des éléments nutritifs.
- l'immobilisation représente la seule perte définitive du sol (en dehors des pertes par drainage non prises en compte ici mais qui sont en grande partie compensées par les apports atmosphériques).

Tableau 10.
Quantification des différents paramètres et étapes du cycle biogéochimique dans les deux peuplements des taillis de chêne vert.

Bioéléments	N		P		K		Ca		Mg	
	Taf.	Reg.	Taf.	Reg.	Taf.	Reg.	Taf.	Reg.	Taf.	Reg.
Parcelle/Flux										
1. Minéralomasse F (kg.ha ⁻¹)	42,30	53,60	8,10	10,20	7,30	9,40	8,00	9,70	5,80	9,70
2. Minéralomasse B (kg.ha ⁻¹)	266,9	259,60	54,10	58,00	74,20	73,4	364,20	200,40	82,00	127,9
3. Incrément bois (kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	4,11	3,71	0,83	0,83	1,14	1,00	5,60	2,86	1,26	1,83
4. Litière F (kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	17,50	20,71	2,20	2,22	2,70	2,96	3,60	3,21	2,02	3,71
5. Litière autre (kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	5,69	6,72	0,83	0,94	0,86	0,88	1,54	1,19	1,06	1,88
6. Translocation (kg.ha ⁻¹)	24,80	32,89	5,90	7,98	4,60	6,44	4,40	6,49	4,74	5,99
7. Transferts (kg.ha ⁻¹)	20,69	29,18	5,07	7,15	3,46	5,44	- 1,20	3,63	3,48	4,16
8. Litière au sol (kg.ha ⁻¹)	83,40	62,13	9,63	7,20	10,00	7,42	34,22	20,40	9,63	11,50
9. Minéralisation	21,75	30,63	23,9	30,50	26,25	34,10	13,06	17,74	24,23	32,71
10. Absorption (%)	27,30	31,14	3,86	3,99	4,70	4,84	10,74	7,26	3,38	7,42
11. Taux de rotation (%)	83,13	88,21	73,83	79,20	75,75	79,34	47,86	60,47	91,12	74,00

Translocation = $1 - 4$ (minéralomasse feuilles – litière feuilles),
 Transfert = $6 - 3$ (translocation – incrément bois),
 Minéralisation = $100 \times (4+5)/(6+7+8)$; selon Jenny et al., [43],
 Absorption = $1 - 7 + 5$ (minéralisation feuilles – transfert + litière autre),
 Taux de rotation = $(4 + 5) \times 100/10$ (litière totale en pourcentage de l'absorption).
 Avec Taf. : Tafachna et Reg. : Reggada

4. Conclusion

L'étude de biomasse de la partie épigée, d'immobilisation d'éléments nutritifs et de chutes de litière dans les taillis de chêne vert dans les deux parcelles du Moyen Atlas marocain montre :

- des régressions allométriques, simples et semblables pour la biomasse de la partie épigée en fonction de D2H. La proportion de partie pérenne (tronc et branches) est presque la même pour les deux parcelles et représente environ 89 %. Les modèles de biomasse élaborés permettent également la quantification des quantités de minéraux majeurs N, P, K, Ca et Mg fixés dans les compartiments aériens.

- la quantité des chutes de litière est presque la même dont les feuilles représente environ 70 %, suivi des branches et des glands (moins de 2,7 %). La litière des iliaies du Moyen Atlas restituent au sol environ 40 kg.ha⁻¹.an⁻¹ d'éléments nutritifs dont presque 74 % sont restitués par les feuilles.

L'exportation des éléments est encore plus marquée si le mode de récolte est par arbre entier. La période de révolution n'est donc pas le seul facteur qui, à long terme, influence la fertilité des sols forestiers. En effet, La production de fortes quantités de biomasse génère une immobilisation importante d'éléments minéraux dans le bois, qui seront exportés liés à l'exploitation classiques des arbres (tronc + branches) qui représente environ 89 % de la biomasse aérienne.

Effectuer un écorçage au moment de l'exploitation permet de restituer surtout de grosses quantités de calcium ainsi que du magnésium. Par contre cette pratique restitue proportionnellement peu pour les autres éléments nutritifs. L'adoption de cette pratique par ailleurs très répandue en Espagne serait de toute façon positive. Mais elle doit être mise en regard des pertes de productivités lors de l'exploitation.

Les contraintes liées à la rentabilité économique du massif sont très élevées dans cet écosystème car la productivité des peuplements est limitée par la pauvreté chimique des sols et la demande en bois de feu et en charbon de la population est plus élevée. La production de bois énergie à faible coût doit impérativement être assurée dans les plantations, afin d'éviter la dégradation du massif par les populations riveraines. Dans ce contexte, la prise compte des fonctions écologiques et environnementales de

conserver cet écosystème aura une importance moins déterminante sur leur durabilité.

References

- [1] A. Schoenenberger, 1975. Cours d'écologie et botanique forestière. Salé : ENFI.
- [2] A. Benabid, M. Fennane. 1999. Principales formations forestières. Gra. Liv. For. Maroc, 12 : 71-93.
- [3] L. Ranger, M.P. Turpault, 1999. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. For Ecol Manag., 122 : 139-154.
- [4] J. Ranger, 2002. Le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers. INRA-Nancy.
- [5] K.P. Singh, 1978. Litter production and nutrient turnover in deciduous forest of Varanasi. In proceeding of the symposium on Recent Advances in tropical ecology, 85 : 655-665.
- [6] M. Rapp, 1967. Production de litière et apport d'éléments minéraux et d'azote dans un bois de Pin d'Alep (*Pinus halepensis Mill.*). Oecol Plant, 2-3 : 325-338.
- [7] P.S. Joshua, H. Stephan, 2007. Nitrogen transfer between decomposing leaves of different N status. Soil Biol. Biochem., 39 : 1428-1436.
- [8] I.S Regina, T. Tarazona, 2001. Organic Matter and nitrogen dynamics in a mature forest of common beech in the Sierra de la Demanda. Spain Ann. For. Sci., 58 : 301-314.
- [9] I.S Regina, 2001. Litter fall, decomposition and nutrient release in three semi-arid forests of the Duero bassin. Spain Forestry, 74 : 347-358.
- [10] R. Sonia, D.R. Miren, C. Isabel, M. Gregorio, 2005. Litterfall in Mediterranean *Pinus Pinaster* Ait. Stands under different thinning regimes. Forest Ecology Management, 206 : 179-190.
- [11] C. Ribeiro, M. Madeira, M.C. Araujo, 2002. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globules* under different water and nutrient regimes. Forest Ecology and Management, 17 : 31-41.
- [12] T. Sariyildiz, J.M. Anderson, M. Kucuk, 2005. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey. Soil Biol. Biochem., 37: 1695-1706.
- [13] W. Badri, T. Gauquelin, 1996. Cycle de l'eau et variations du stock d'eau dans le sol dans une station à Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera L.*) dans le Haut Atlas de Marrakech. Ecohydrology of high mountain areas. Proceedings of the ICIMOD, Kathmandu, Nepal, 315-321.
- [14] T. Gauquelin, F. Fromard, W. Badri, J. Dagnac, 1992. Apports d'éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière, des pluies et des pluviollessivats dans un peuplement à Genévrier thurifère (*Juniperus thurifera L.*) du Haut Atlas Occidental (Maroc). Ann. Sci. For. Maroc, 49 : 599-614.
- [15] T. Gauquelin, V. Bertaudière, N. Montes, W. Badri, 1998. Cycle biogéochimique et hétérogénéité édaphique des groupements forestiers pré-steppiques à genévrier thurifère du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). Ecologie, 29 : 177-180.
- [16] N. Montes, V. Bertaudière, W. Badri, H. Zaoui, T. Gauquelin, 2002. Biomass and nutrient content of a semi-arid mountain ecosystem: the *Juniperus thurifera L.* woodland of Azzaden Valley (Morocco). Forest Ecology and management, 166 : 35-43.
- [17] W. Badri, M. Fadal, M. Hsine, H. Fougrach, 2007. Contribution à l'étude des apports d'éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la

- litière, des pluies et des pluviocivivats dans la subéraie (*Quercus Suber L.*) de la région de Benslimane. Ann. Rech. For. Maroc, 39 : 178-184.
- [18] M. Boulmane, M. Halim, S. El Antry-Tazi, K. Berred, H. El Harchaoui, 2007. Evaluation du stock du carbone et dynamique de la décomposition de la matière organique dans les sols de la Maâmora. Ann. Rech. For. Maroc, 39 : 185-194
- [19] J.D. Aber, J.M. Melillo, 1980. Litter decomposition measuring state of decay and percent transfer into forest soils. Can. J. Bot., 58 : 416-421.
- [20] J.M. Melillo, J.D. Aber, J.F. Muratore, 1980. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. Ecology, 63 : 621-626.
- [21] B. Berg, H. Staaf, 1980. Decomposition rate and chemical changes of Scots pine litter II. Ecol. Bul., 32 : 373-390.
- [22] T.R. Seatedt, 1984. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. Ann. Rev. Entomol., 29 : 25-46.
- [23] V. Meentemeyer, 1978. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. Ecology, 59 : 465-472.
- [24] S. Papa, A. Pallegriano, A. Fioretto, 2008. Microbial activity and quality changes during decomposition of *Quercus ilex* leaf in three Mediterranean woods. Applied Soil Ecology, 40 : 401-410.
- [25] P. Duchaufour, 1970. Précis de pédologie. Paris : Edition Masson.
- [26] L. Saint-André, N. Picard, 2005. Construire des tarifs de cubage, biomasses, minéralomasse. INRA-Nancy.
- [27] M. Ezzahiri, B. Belghazi, F. Romane, M. Qarro, M. Sabir, S. Moussaoui, 1995. Phytomasse et accroissement du chêne vert dans le dispositif expérimental de Dayet Aoua du Moyen Atlas. Ann. Rech. For. Maroc, 31 : 9-16.
- [28] B. Belghazi, M. Ezzahiri, S. Aoid, M. El-Tobi, 2001. Estimation de la biomasse du chêne vert dans le massif forestier d'Aït Hatem (Oulmes). Ann. Rech. For. Maroc, 34 : 9-16.
- [29] J. Ranger, C. Barneoud, C. Nys, 1988. Production ligneuse et rétention d'éléments nutritifs dans les taillis à courte rotation de peuplier « Rochester » : effet de la densité d'ensouchement. Acta Oecol. Plant, 9 : 245-269.
- [30] P. Duvigneaud, D.S Denayer, 1974. Le cycle des éléments biogène dans l'écosystème forêt. Lejeunia, 28 : 16-48
- [31] G. Lemee, 1974. La production primaire de la forêt. Paris : Gauthier-Villars.
- [32] S. Leonardi, M. Rapp, M. Failla, Guarnaccia D, 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.
- [33] M. Makhloufi, M. Boulmane, L. Saint-André, J.P. Bouillet, M. Abourouh, M. Ezzahiri, B. Belghazi, H. El Harchaoui. 2008. Tarifs de cubage, modélisation de la biomasse des taillis du chêne vert du Moyen Atlas : cas des iliaies de Taffechna et Reggada. Ann. Rech. For. Maroc, 40 : 123-135.
- [34] M. Rapp, 1969. Production de litière et apport au sol d'éléments minéraux dans les écosystèmes méditerranéens : La forêt de *Quercus ilex L.* et la garrigue de *Quercus coccifera L.*. Oecol. Plant, 4 : 377-410.
- [35] B. Berg, J.E Lundmark, 1987. Decomposition of needle litter in *Pinus contorta* and *Pinus Sylvestris*. Scand. J. For. Res., 2 : 3-12.
- [36] W. Qingkui, W. Silon, H. Yung, 2007. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China. For. Ecol. Manag., 255 : 1210-1218.
- [37] R.G. Lechmere, G.I.H. Kerley, A.J. Mills, R.M. Cowling, 2008. Litter dynamics across browsing-induced fenceline contrasts in succulent thicket, South Africa. South Africa J. Bot., 74 : 651-659.
- [38] I.S. Regina, M. Rapp, A. Martin, J.F. Gallardo, 1997. Nutrient release dynamics in decomposing leaf litter in two Mediterranean deciduous oak species. Ann. Sci. For., 54 : 747-760
- [39] J.G. Bockheim, E.A. Jensen, D.M. Heisey, 1991. Nutrient dynamics in decomposing leaf litter of four tree species on a sandy soil in Northwestern Wisconsin. Can. J. For. Res., 21 : 803-812
- [40] I.M. Hernandez, I.S. Regina, J.F. Gallardo, 1995. Dynamics of bioelements during leaf decomposition in three forest ecosystems of semi-arid climate in the Duero basin. Arid Soil Res. Rehab., 9 : 437-455
- [41] J.R. Gosz, G.E Likens, F.H Bormann, 1973. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. Ecol. Monogr., 43 : 173-191.
- [42] W.H. Schlesinger, 1986. Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery : the changing carbon cycle- A global analysis. New York : Springer-Verlag.
- [43] H. Jenny, S. Gessel, F.T. Bingham, 1949. Comparative study of forestier of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. Soil Sci., 2 : 419-432.
- [44] S. Leonardi, M. Rapp, M. Failla, D. Guarnaccia, 1996. Biomasse, productivité et transferts de matière organique dans une séquence altitudinale de peuplements de *Castanea sativa Mill* de l'Etna. Ann. Sci. For., 53 : 1031-1048.