



HAL
open science

Biomasses et minéralomasses aériennes de cinq peuplements de Douglas du réseau Rénécofor : quantification et implications sylvicoles.

Jacques Ranger, Quentin Ponette

► To cite this version:

Jacques Ranger, Quentin Ponette. Biomasses et minéralomasses aériennes de cinq peuplements de Douglas du réseau Rénécofor : quantification et implications sylvicoles.. *Revue forestière française*, 2000, 52 (2), pp.115-134. <10.4267/2042/5345>. <hal-03443678>

HAL Id: hal-03443678

<https://hal.science/hal-03443678v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

biologie et forêt

BIOMASSES ET MINÉRALOMASSES AÉRIENNES DE CINQ PEUPELEMENTS DE DOUGLAS DU RÉSEAU RÉNÉCOFOR : QUANTIFICATION ET IMPLICATIONS SYLVICOLES

Q. PONETTE - J. RANGER

Quels que soient les objectifs déterminants fixés par l'aménagement, la gestion forestière doit garantir la stabilité à long terme de l'écosystème dans son ensemble, en veillant notamment à l'amélioration ou au maintien de la fertilité stationnelle. Le stock en éléments minéraux du sol étant un des facteurs conditionnant cette dernière, il est essentiel de pouvoir en contrôler l'évolution, d'autant que les écosystèmes forestiers sont pour la plupart des systèmes à faibles intrants et que les sols sont en outre fréquemment acides et très désaturés (Ponette *et al.*, 1997 ; Badeau et Ulrich, 1998 ; Badeau, 1998 ; Badeau *et al.*, 1999).

En pratique, un tel suivi nécessite l'établissement d'un bilan en éléments minéraux au niveau du sol, c'est-à-dire la quantification des principales entrées et sorties du système considéré (Ranger et Bonneau, 1984). En définissant le sol comme l'ensemble des horizons minéraux, héli-organiques, holorganiques [OL : horizon constitué de débris foliaires et ligneux sans matière organique fine ; OF : horizon composé de résidus végétaux en mélange avec des proportions plus ou moins grandes (< 70 % en recouvrement visuel) de matière organique fine ; OH : horizon contenant plus de 70 % en volume de matière organique fine (Jabiol *et al.*, 1995)] et de leurs constituants — à l'exclusion des organismes végétaux ou animaux vivants — de la surface à la profondeur maximale d'enracinement, les éléments minéraux prélevés et stockés dans les arbres vivants du peuplement constituent une perte pour le sol. En l'absence d'exportation, cette perte est toutefois temporaire puisque les éléments minéraux prélevés par la végétation sont partiellement restitués au sol sous formes soluble (récrétion par les organes aériens, excrétion racinaire) et solide, ou retournent au sol à la

mort des arbres. L'exportation de la biomasse lors de la récolte aboutit, en revanche, à une perte définitive des éléments stockés dans les compartiments correspondants. Cette dernière doit par conséquent pouvoir être évaluée par le gestionnaire dans l'optique du maintien à long terme du stock en éléments minéraux du sol.

Cet article rapporte les résultats d'une étude conduite dans cinq des six peuplements de Douglas [*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco] du réseau RÉNÉCOFOR (RÉseau national de suivi à long terme des ÉCOsystèmes FORestiers), dispositif visant à mieux comprendre les mécanismes affectant le fonctionnement à long terme d'écosystèmes forestiers représentatifs des sylvicultures pratiquées en France (Ulrich, 1995 ; ONF, 1996).

Les objectifs poursuivis sont les suivants : évaluer les biomasses et les quantités d'éléments minéraux des parties aériennes des peuplements, mettre en relation les stocks en éléments minéraux des sols (couches holorganiques, couches minérales 0-100 cm) avec ceux des parties aériennes des peuplements correspondants, et dégager les implications pratiques de ces résultats pour la gestion sylvicole. Les résultats acquis complètent ceux obtenus précédemment par l'étude d'une chronoséquence de Douglas (20, 40, 60 ans) localisée dans le Beaujolais (Ranger *et al.*, 1995 ; Marques *et al.*, 1996).

Le Douglas est l'une des essences les plus utilisées actuellement dans les reboisements en France, sa contribution au reboisement résineux annuel s'élevant en moyenne à 30 % en terme de surface. La superficie totale des peuplements, très nettement dominée par les classes d'âges jeunes, dépassait les 333 000 ha selon les résultats de l'Inventaire forestier national disponibles en 1999. Il s'agit par ailleurs d'une essence à fort potentiel de production dans les conditions climatiques et écologiques de la forêt française, comme l'indiquent les simulations de croissance en volume effectuées par l'AFOCEL (AFOCEL, 1997). Ces simulations montrent que, pour une densité de plantation de 1100 tiges/ha, un diamètre moyen final à hauteur de poitrine de 50 cm, six éclaircies, et une coupe finale à une hauteur dominante de 40 m (soit à 61 ans sur les sites considérés), la production totale de bois (en volume sur écorce à la découpe 7 cm de diamètre) atteint 1100 m³/ha, soit un accroissement annuel moyen en volume de 17,9 m³/ha/an. Malgré cette importante production, les connaissances sur les quantités d'éléments nutritifs exportés par cette essence dans les écosystèmes européens sont encore fragmentaires (Ranger *et al.*, 1995).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sélection des placettes et principales caractéristiques

Cinq des six peuplements de Douglas du réseau RÉNÉCOFOR ont été étudiés. Ils sont situés dans les départements suivants : Creuse (23), Hérault (34), Orne (61), Rhône (69) et Saône-et-Loire (71). Dans la suite, ils sont désignés par un code reprenant les trois premières lettres du nom de l'essence (DOU), suivies du numéro du département. À l'exception de l'Orne, les départements correspondants ont une importante superficie boisée en Douglas (> 5 000 ha) ou sont situés à proximité immédiate de tels départements. Le peuplement du réseau localisé dans les Hautes-Pyrénées (DOU 65) n'a pas été considéré en raison d'une surface terrière anormalement faible (Cluzeau *et al.*, 1998).

D'après les tables de production de Décourt (Décourt et Vannière, 1984), les peuplements situés au nord-est du Massif Central (DOU 69 et DOU 71) appartiennent aux classes de fertilité 2 et 1 à 2, respectivement, tandis que la placette localisée à l'ouest du Massif Central (DOU 23) relève de la classe de fertilité 2. Pour les deux autres peuplements, aucune table de production n'est disponible pour l'instant.

En comparant les teneurs foliaires à des données publiées (Bonneau, 1995), le statut nutritionnel semble satisfaisant dans tous les peuplements et pour tous les éléments à l'exception du phosphore qui pourrait être limitant dans certains cas. L'observation des houppiers ne révèle toutefois aucun signe de dépérissement ni de carence.

Les peuplements étudiés appartiennent à trois classes d'âges : 26-29 ans, 36 ans et 54 ans. Les principales caractéristiques des peuplements et des arbres moyens correspondants lors de l'échantillonnage (hiver 1997-1998) sont reprises au tableau I (p. 118). On note, en particulier, la différence de nombre de tiges et de volume par hectare entre les trois classes d'âges. Des renseignements complémentaires sur l'historique des peuplements (antécédents, éclaircies), les caractéristiques dendrométriques et la dendrochronologie sont donnés respectivement par Ponce *et al.* (1998), Cluzeau *et al.* (1998) et Lebourgeois (1997).

Les tableaux II (p. 118) et III (p. 119) reprennent les caractéristiques générales des sites et des sols, respectivement.

Comme l'indique le tableau III (p. 119), les sols de toutes les placettes sont acides et désaturés. Dans la placette DOU 34, le taux de saturation moyen en bases dans les 40 premiers cm du sol montre cependant une forte variabilité latérale, oscillant entre 15 % et 100 % (Ponette *et al.*, 1997). Les teneurs en argile varient entre 16,9 et 18,7 % (DOU 23), 31,2 et 32,9 % (DOU 34), 9,5 et 13,1 % (DOU 61), 14,9 et 20,7 % (DOU 69) et 6,9 et 17,5 % (DOU 71). Des informations complémentaires sur les sols sont données par Ponette *et al.* (1997) et Brêthes et Ulrich (1997).

Échantillonnage des arbres et des sols

• Arbres

Tous les échantillons ont été prélevés durant la période hivernale, entre le 26 janvier 1998 et le 26 mars 1998.

Un inventaire complet a été réalisé dans chaque placette RÉNÉCOFOR (surface $\approx 5\ 000\ m^2$) afin de caractériser la distribution des arbres en diamètre à 1,30 m. Quatorze arbres ont été sélectionnés dans la zone tampon de chacune des placettes étudiées, de façon à couvrir la gamme de diamètres à 1,30 m rencontrée dans la placette correspondante (tableau IV, p. 119). Pour chaque classe de diamètre, le choix des individus s'est porté sur les arbres les plus représentatifs de la parcelle en termes de conformité et de statut social, tout en intégrant la plus petite et la plus grosse tige de la parcelle (en diamètre à 1,30 m). Ces 14 arbres ont été abattus pour échantillonnage, et leur hauteur totale a été mesurée.

Un inventaire complet des branches a été conduit sur chaque arbre abattu. Les paramètres suivants ont été mesurés :

- diamètre des branches à 10 cm du point d'insertion sur le tronc (D10),
- statut de la branche (vivante ou morte),
- position et âge des verticilles.

La longueur du houppier vivant a été estimée en soustrayant de la hauteur totale de l'arbre la hauteur de la première branche vivante. Entre une et quatre branches vivantes ont été prélevées par arbre, de façon à couvrir la gamme des diamètres (D10) et positions de branches rencontrée sur l'ensemble des 14 arbres de la placette (tableau IV, p. 119). Les branches échantillonnées ont été mises en sacs plastiques, et ramenées au laboratoire pour mesure des poids secs (65 °C, poids constant) et analyses chimiques individuelles des parties ligneuses (bois + écorce) et des aiguilles. Dans la suite du texte, les parties ligneuses des branches seront dénommées simplement "bois des branches".

Tableau I Principales caractéristiques des peuplements et des arbres (hiver 1997-1998)

Placette	Peuplement				Arbre moyen ⁽¹⁾	
	Âge ⁽²⁾ (ans)	Densité (Nb/ha)	Volume ⁽³⁾ (m ³ /ha)	Surface terrière ⁽⁴⁾ (m ² /ha)	Volume ⁽³⁾ (dm ³)	Surface terrière ⁽⁴⁾ (dm ²)
DOU 71	26	640	313	31,5	488,9	4,9
DOU 23	28	622	284	35,0	457,7	5,6
DOU 69	29	587	309	34,2	527,4	5,8
DOU 61	36	322	400	33,8	1 239,9	10,5
DOU 34	54	243	747	49,0	3 076,5	20,2

- (1) Moyenne des mesures individuelles obtenues lors de l'inventaire total de la placette.
 (2) Âge moyen déterminé par comptage de cerne sur les souches des arbres échantillonnés. Les hauteurs dominantes des peuplements en 1995 sont données par Cluzeau *et al.* (1998).
 (3) Volume commercial (volume sur écorce, diamètre > 7 cm).
 (4) Surface terrière à hauteur de poitrine.

Tableau II Caractérisation générale des sites
 Les peuplements sont triés par âge moyen croissant

Placette	DOU 71	DOU 23	DOU 69	DOU 61	DOU 34
Localisation (forêt - commune - département)	Forêt domaniale d'Anost Anost (Saône-et-Loire)	Forêt sectionnale du Maupuy Saint-Léger-le-Guérois (Creuse)	Forêt départementale de Brou Dième (Rhône)	Forêt domaniale d'Écouves La-Lande-de-Goult (Orne)	Forêt domaniale des Avant-Monts Verreries-de-Moussans (Hérault)
Température moyenne annuelle ⁽¹⁾ (°C)	10,3	10,9	10,9	10,4	13,5
Précipitations annuelles moyennes ⁽¹⁾ (mm)	813,1	1022,9	841,4	735,2	695,1 ⁽²⁾
Altitude (m)	650	610	520	375	700
Topographie	Croupe	Plateau	Versant	Plateau	Versant
Pente (%)	10	5 < pente ≤ 10	50	≤ 5	21
Exposition	Sud-Ouest	Ouest	Ouest	Sans objet	Sud
Type de sol ⁽³⁾	Podzozol ocrique	Podzozol ocrique humifère (F1) Alocrisol typique humifère (F2)	Alocrisol typique	Podzozol ocrique luvique	Brunisol oligosaturé (F1) Brunisol oligosaturé leptique (F2)
Matériau parental	Colluvion granitique	Arène granitique sablo-limono- argileuse	Altérite limono- sableuse de gneiss	Altérite limono- sableuse de grès	Altérite limono- sableuse de schistes

- (1) Valeurs moyennes calculées sur une période de 30 ans (1961-1990) pour toutes les stations à l'exception de DOU 23 (1973-1990) (Météo-France, 1996). Les stations météorologiques de référence sont celles de Nevers (DOU 71), Limoges (DOU 23), Mâcon (DOU 69), Alençon (DOU 61) et Carcassonne (DOU 34).
 (2) En raison de la différence d'altitude entre la placette (700 m) et la station météorologique de référence associée (126 m), les précipitations annuelles moyennes dans la placette DOU 34 sont vraisemblablement largement sous-estimées.
 (3) D'après Brêthes et Ulrich (1997). Nomenclature du référentiel pédologique (AFES, 1995). F1, F2: fosses n° 1, n° 2.

Biologie et forêt

Tableau III Propriétés chimiques moyennes des sols à deux profondeurs
Les peuplements sont triés par âge moyen croissant

Placette	Couche ⁽¹⁾ (cm)	C org ⁽²⁾	N ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾	pH ⁽⁵⁾	H	Al	Ca	Mg	K	CEC ⁽⁷⁾	SB ⁽⁸⁾ (%)
		(g/kg)	(g P/kg)	H ₂ O	Cations échangeables ⁽⁶⁾ (cmol _c /kg)							
DOU 71	0-10	100,80	4,75	0,038	4,00	0,71	8,37	0,47	0,38	0,18	10,11	10,0
	40-80	31,18	1,72	0,146	4,89	0,00	0,92	0,03	0,02	0,04	1,00	8,5
DOU 23	0-10	92,48	8,69	0,021	4,02	0,08	5,99	0,44	0,16	0,11	6,82	10,3
	40-80	8,82	0,81	0,057	4,75	0,00	0,77	0,22	0,02	0,03	1,04	25,4
DOU 69	0-10	73,57	3,19	0,011	4,12	1,25	8,38	0,89	0,32	0,24	11,09	13,1
	40-80	10,62	0,60	0,003	4,46	0,05	3,43	0,02	0,06	0,20	3,76	7,2
DOU 61	0-10	51,60	2,31	0,015	3,97	0,94	4,47	0,42	0,14	0,11	6,08	11,0
	40-80	3,57	0,26	0,008	4,59	0,00	1,70	0,01	0,02	0,07	1,80	6,0
DOU 34	0-10	25,17	2,15	0,015	4,72	0,19	1,96	2,46	0,43	0,16	5,21	50,4
	40-80	6,05	0,78	0,005	4,84	0,00	2,09	0,36	0,12	0,10	2,66	20,5

- (1) Pour des informations concernant l'échantillonnage, se référer au texte.
 (2) Carbone organique mesuré par oxydation avec K₂Cr₂O₇.
 (3) Azote total déterminé par la méthode Kjeldahl.
 (4) Phosphore extrait par la méthode Dyer (AFNOR, 1987).
 (5) Rapport volumique sol : H₂O 1 : 5.
 (6) Extraction avec BaCl₂ 0,1 M.
 (7) CEC ou Capacité d'Échange des Cations : acidité d'échange (H, Al) + somme des bases échangeables (Ca, Mg, K).
 (8) Saturation en bases : ((Ca + Mg + K éch.) / CEC) × 100.

Tableau IV Diamètre des branches (D10) et des arbres (DBH) échantillonnés
Les peuplements sont triés par âge moyen croissant

Placette	Âge (ans)	D10 ⁽¹⁾ (mm)		DBH ⁽²⁾ (cm)	
		Min	Max	Min	Max
DOU 71	26	3,5	55,0	9,1	41,9
DOU 23	28	5,4	49,5	10,6	43,6
DOU 69	29	4,1	50,0	17,9	40,3
DOU 61	36	7,1	50,5	20,4	50,0
DOU 34	54	5,5	52,0	27,3	69,2

- (1) D10 (mm) : diamètre des branches à 10 cm du point d'insertion sur le tronc.
 (2) DBH (cm) : diamètre des arbres à 1,30 m.

Après ébranchage, le tronc a été sectionné en billons afin de mesurer son poids frais total (bois + écorce) et de prélever des disques échantillons. Ces disques, immédiatement placés en sacs plastiques pour limiter toute perte d'humidité, ont servi aux déterminations suivantes : teneur en eau pondérale (65 °C, poids constant), rapports pondéraux $\left(\frac{\text{poids sec bois}}{\text{poids sec total}}\right)$ et $\left(\frac{\text{poids sec écorce}}{\text{poids sec total}}\right)$, et concentrations élémentaires. Une rondelle supplémentaire a été prélevée à la base de l'arbre pour comptage des cernes. Les échantillons composites pour les analyses de bois ont été obtenus

en sous-échantillonnant chaque rondelle de façon à intégrer les variabilités latérale et verticale des concentrations en éléments liées au développement des tissus. Les échantillons composites pour les analyses d'écorce ont regroupé l'intégralité du matériel de chaque disque.

- *Sols*

Dans les couches holorganiques (OL, OF, OH) et les 40 premiers cm du sol minéral, les prélèvements ont été effectués dans 5 grappes, à 4 ou 5 niveaux [OL + OF + OH (si OH < 1 cm) ou OL + OF et OH (si OH ≥ 1 cm), 0-10, 10-20, 20-40 cm]. Les échantillons composites pour analyses et pour détermination des poids secs de nécromasse par unité de surface (horizons holorganiques) ou des densités apparentes sèches de la terre fine (couches minérales) ont été obtenus comme décrit par Ponette *et al.* (1997).

Au-dessous de 40 cm, les échantillons ont été prélevés dans les couches 40-80 cm et 80-100 cm, sur deux fosses. Deux échantillons composites pour analyses ont été obtenus par fosse et couche en combinant, en volumes identiques, 4 (couche 40-80 cm) ou 2 (couche 80-100 cm) sous-échantillons prélevés par tranches de 10 cm d'épaisseur sur deux faces de la fosse. Les échantillons composites pour la détermination de la densité apparente sèche de la terre fine ont été obtenus suivant le même protocole, en utilisant des cylindres. En l'absence de prélèvements au cylindre (présence d'éléments grossiers de diamètre > 2 cm), le poids sec de la terre fine (t/ha) a été évalué en soustrayant d'abord le volume de cailloux (diamètre > 2 mm) du volume de la couche correspondante, et en multipliant ensuite le volume résultant (m³/ha) par une densité apparente sèche de 1,4 (t/m³).

Analyses chimiques

- *Arbres*

Pour chacun des compartiments individualisés (bois de tronc, écorce de tronc, bois + écorce des branches, aiguilles), les teneurs en éléments ont été déterminées par la méthode Kjeldahl (azote, N) ou dosées par émission en plasma induit d'argon (ICP) après calcination et solubilisation (phosphore, P ; potassium, K ; calcium, Ca ; magnésium, Mg).

Les stocks en éléments des différents compartiments ont été obtenus en multipliant les concentrations totales par les poids secs correspondants.

- *Sols*

Les méthodes mises en œuvre pour extraire et doser les éléments dans les couches holorganiques et minérales du sol ont été décrites par Ponette *et al.* (1997).

Pour chaque couche de sol, les stocks en éléments ont été estimés en multipliant les concentrations élémentaires par le poids de nécromasse ou de terre fine correspondant. Les stocks minimaux, moyens et maximaux des couches minérales 0-100 cm ont été évalués en cumulant les valeurs minimum, moyennes et maximum, respectivement, des stocks 0-40 cm et 40-100 cm. Étant donné les différences de méthodes entre couches holorganiques et minérales, les stocks d'éléments y ont été calculés indépendamment.

Évaluation des biomasses et des minéralomasses

L'évaluation des biomasses ou minéralomasses nécessite l'obtention d'une relation étroite et non biaisée entre la grandeur à estimer — non mesurable en pratique — et une ou des grandeurs facilement mesurables (par exemple le diamètre des arbres à 1,30 m). La démarche est identique à

celle nécessaire pour construire un tarif de cubage d'arbre où la grandeur à estimer est un type de volume donné (par exemple, volume sur écorce pour le tronc de diamètre > 7 cm) et où les grandeurs mesurées peuvent être le diamètre à 1,30 m et/ou la hauteur totale des arbres. Après échantillonnage adéquat dans la population cible, le choix d'un modèle statistique approprié permet d'estimer les paramètres du modèle et d'obtenir pour ceux-ci un intervalle de confiance.

Pour cette étude, les équations de prédiction ont été obtenues par régressions linéaires et non linéaires. La méthode mise en œuvre a différé quelque peu suivant le compartiment considéré – tronc ou houppier. Au niveau du tronc (bois, écorce), les régressions entre biomasses ou minéralomasses et le diamètre à 1,30 m ont été établies à partir des arbres échantillons ; les équations correspondantes ont alors été appliquées à l'inventaire des diamètres à 1,30 m des placettes. Au niveau du houppier (bois + écorce des branches, aiguilles), l'évaluation des biomasses ou minéralomasses a nécessité deux étapes. Des régressions entre biomasses ou minéralomasses et caractéristiques des branches ont d'abord été établies à partir des branches échantillonnées ; appliquées à l'inventaire total des branches, ces équations ont permis d'estimer les biomasses ou minéralomasses du houppier vivant pour chaque arbre échantillonné. Dans une seconde étape, les régressions entre les biomasses ou minéralomasses précédemment estimées et le diamètre à 1,30 m ont été établies, et les équations correspondantes appliquées à l'inventaire des diamètres à 1,30 m des arbres des placettes correspondantes.

Tous les tests statistiques ont été effectués à un niveau de probabilité (α) de 0,05.

La forme générale de chaque modèle testé est reprise à l'annexe 1 (p. 132).

Des analyses de variance à un facteur fixe (placette) ont été utilisées pour tester les différences de concentrations entre placettes à élément et compartiment fixés. Les effets "âge" et "fertilité" ont été testés à l'aide de contrastes, à l'intérieur du modèle statistique sélectionné.

RÉSULTATS

Teneurs moyennes en éléments dans les arbres

Les concentrations moyennes en éléments (N, P, K, Ca, Mg) par compartiment et peuplement figurent au tableau V (p. 122). Quels que soient les éléments ou les placettes considérés, les concentrations moyennes augmentent suivant : bois du tronc << écorce du tronc < bois des branches << aiguilles. En se basant sur le niveau des concentrations moyennes (g/kg), trois groupes d'éléments peuvent être individualisés : P, Mg < Ca, K < N.

Les tests de comparaisons multiples de moyennes montrent des différences significatives entre certaines placettes pour la très grande majorité des combinaisons **élément - compartiment**. L'amplitude des différences, de même que les regroupements de placettes correspondants, dépendent à la fois de l'élément et du compartiment.

Le rapport entre les concentrations moyennes maximales et minimales varie également suivant les éléments et les compartiments, entre un minimum de 1,1 (K, aiguilles) et un maximum de 2,5 (N, bois de tronc). Des rapports (max/min) ≥ 2 sont observés pour Ca dans tous les compartiments à l'exception du bois de tronc, de même que pour N, K et Mg dans le bois de tronc.

L'effet "âge" s'est révélé significatif pour toutes les combinaisons **concentration en élément - compartiment**, sauf pour les concentrations en P et K dans les aiguilles. De même, l'effet "fertilité" (DOU 71, 23, 69) s'est montré significatif dans la plupart des cas, sauf pour la concentration en N dans le bois des branches, ainsi que pour la teneur en Ca dans le bois et l'écorce de tronc.

Tableau V **Concentrations moyennes en éléments dans les différents compartiments**
Les peuplements sont triés par âge moyen croissant

Placette	Âge (ans)	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	
		(g/kg)					(g/kg)					
		Bois de tronc					Écorce de tronc					
DOU 71 ...	26	1,02a	0,045a	0,32a	0,23*	0,067a	4,76a	0,45a	2,33a	1,57bc	0,38a	
DOU 23 ...	28	0,87a	0,033b	0,23b	0,22	0,050b	4,56a	0,32bc	1,74b	2,03ab	0,32ab	
DOU 69 ...	29	0,86a	0,035ab	0,29ab	0,24	0,040bc	3,86b	0,38b	2,30a	1,96ab	0,23c	
DOU 61 ...	36	0,95a	0,034b	0,26ab	0,19	0,047bc	3,60b	0,32bc	1,53b	1,17c	0,24c	
DOU 34 ...	54	0,40b	0,027b	0,13c	0,23	0,032c	3,35b	0,30c	1,35b	2,58a	0,27bc	
		Bois des branches					Aiguilles					
DOU 71 ...	26	5,16ab	0,54ab	2,58ab	1,72b	0,62a	15,51b	1,07a	5,18a	3,31b	1,24a	
DOU 23 ...	28	5,43ab	0,40c	2,21b	2,01b	0,46a	19,92a	0,90b	4,74a	3,32b	0,96c	
DOU 69 ...	29	6,01a	0,60a	3,25a	3,49a	0,60a	15,13b	0,98ab	5,33a	6,51a	1,19ab	
DOU 61 ...	36	4,23b	0,42bc	2,44b	1,71b	0,45a	16,31b	0,97ab	4,89a	3,00b	0,98bc	
DOU 34 ...	54	4,86ab	0,45bc	1,98b	3,44a	0,44a	15,68b	1,00ab	4,67a	6,11a	1,26a	

Pour chaque compartiment et élément, les concentrations sans lettres communes diffèrent significativement à $P < 0,05$ (test de Scheffé).

* Test F global non significatif ($P < 0,05$).

Les résultats des tests relatifs aux effets “âge” et “fertilité” doivent toutefois être interprétés avec prudence pour les deux raisons suivantes :

- la taille limitée de l'échantillon, ainsi que la présence de nombreux facteurs de variation non contrôlés, peuvent entraîner des effets compensatoires ;
- les effets significatifs impliquent des regroupements de placettes très variables.

Biomasses aériennes des arbres

Les biomasses aériennes des peuplements étudiés sont reprises au tableau VI (p. 123), compartiment par compartiment.

La biomasse aérienne totale augmente avec l'âge des peuplements, depuis environ 160 t/ha dans les peuplements les plus jeunes jusqu'à 360 t/ha dans la placette de 54 ans. Cette évolution est liée principalement à l'augmentation de la biomasse du bois de tronc ; secondairement, l'écorce contribue également à l'augmentation de la biomasse aérienne totale dans la placette DOU 34.

La biomasse du bois de tronc prédomine dans chaque placette, représentant entre 70 % et 80 % de la biomasse aérienne totale. En revanche, la contribution des aiguilles ou de l'écorce de tronc au total est toujours inférieure ou égale à 10 %. Avec des valeurs de l'ordre de 13 à 14 t/ha, la biomasse des aiguilles semble plus élevée dans les trois peuplements les plus jeunes.

La biomasse du bois prédomine tant au niveau du tronc, qu'à celui des branches. Au niveau du tronc, la contribution de l'écorce à la biomasse est seulement d'environ 10 %. Au niveau des branches, la proportion de la biomasse ligneuse oscille entre 59 et 73 %, augmentant avec l'âge du peuplement.

Tableau VI

Biomasses aériennes des peuplements étudiés
Les peuplements sont triés par âge moyen croissant

Compartiment	Peuplement									
	DOU 71 Biomasse		DOU 23 Biomasse		DOU 69 Biomasse		DOU 61 Biomasse		DOU 34 Biomasse	
	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)	(t/ha)	(%)
Bois de tronc	114,1	71,7	116,0	69,8	114,2	69,5	148,6	76,4	292,5	80,6
Écorce de tronc . . .	13,4	8,4	13,0	7,8	15,0	9,1	16,8	8,6	35,4	9,8
Total tronc	127,5	80,1	129,0	77,6	129,1	78,6	165,3	85,0	327,9	90,3
Bois des branches .	18,9	11,9	23,1	13,9	20,8	12,7	19,4	10,0	25,6	7,1
Aiguilles	12,8	8,0	14,1	8,5	14,3	8,7	9,7	5,0	9,5	2,6
Total houppier	31,7	19,9	37,2	22,4	35,1	21,4	29,2	15,0	35,1	9,7
Total arbre	159,1	100	166,2	100	164,3	100	194,5	100	363,0	100

Minéralomasses des peuplements

Le tableau VII (p. 124) présente les minéralomasses aériennes par élément, peuplement et compartiment. Pour chaque compartiment, les minéralomasses sont exprimées en termes absolus (kg/ha), ou en pourcentages pondéraux des minéralomasses aériennes totales correspondantes.

Comme pour les concentrations, trois groupes d'éléments peuvent être individualisés sur la base des minéralomasses aériennes totales : P, Mg < Ca, K < N. En considérant les minéralomasses aériennes totales, aucune évolution liée à l'âge n'apparaît pour aucun élément. À élément fixé, le rapport entre les minéralomasses aériennes totales maximum et minimum s'établit aux environs de 1,2-1,3 pour N, P, K, Mg, alors qu'il atteint une valeur de 2 pour Ca. Le rapport supérieur observé pour ce dernier élément résulte des minéralomasses en calcium comparativement supérieures dans les placettes DOU 69 et DOU 34, en relation avec les valeurs élevées des compartiments houppier et tronc, respectivement. La minéralomasse du tronc apparaît plus élevée dans la placette DOU 34 pour tous les éléments. Cette observation s'explique principalement par les biomasses d'écorce et de bois de tronc nettement plus élevées dans ce peuplement (tableau VI, ci-dessus).

En raison des différences de concentrations entre compartiments (tableau V, p. 122), la distribution des biomasses diffère nettement de celle des minéralomasses (comparer les tableaux VI, ci-dessus et VII, p. 124). Par exemple, si la contribution de la biomasse du bois de tronc à la biomasse aérienne totale est ≥ 70 %, sa contribution à la minéralomasse aérienne totale n'excède jamais 32 %. À l'opposé, la contribution des aiguilles à la minéralomasse totale oscille entre 20 % (Ca, DOU 34) et 53 % (N, DOU 23), malgré une contribution inférieure à 10 % en terme de biomasse. Le contraste est également saisissant si l'on compare les compartiments écorce et bois au niveau du tronc : pour un pourcentage correspondant en terme de biomasse d'environ 10 %, la contribution de l'écorce à la minéralomasse totale du tronc (bois + écorce) s'établit à 30-50 % pour N, 50-60 % pour P, 39-55 % pour K, 38-57 % pour Ca et 37-51 % pour Mg.

Stocks d'éléments dans les sols

La figure 1 (p. 125) compare les stocks d'éléments dans la biomasse aérienne totale des peuplements, dans les couches holorganiques (OL + OF + OH) et dans les couches minérales (0-100 cm).

Q. PONETTE - J. RANGER

Tableau VII Minéralmasses aériennes et répartition des éléments dans les peuplements étudiés
Les peuplements sont triés par âge moyen croissant

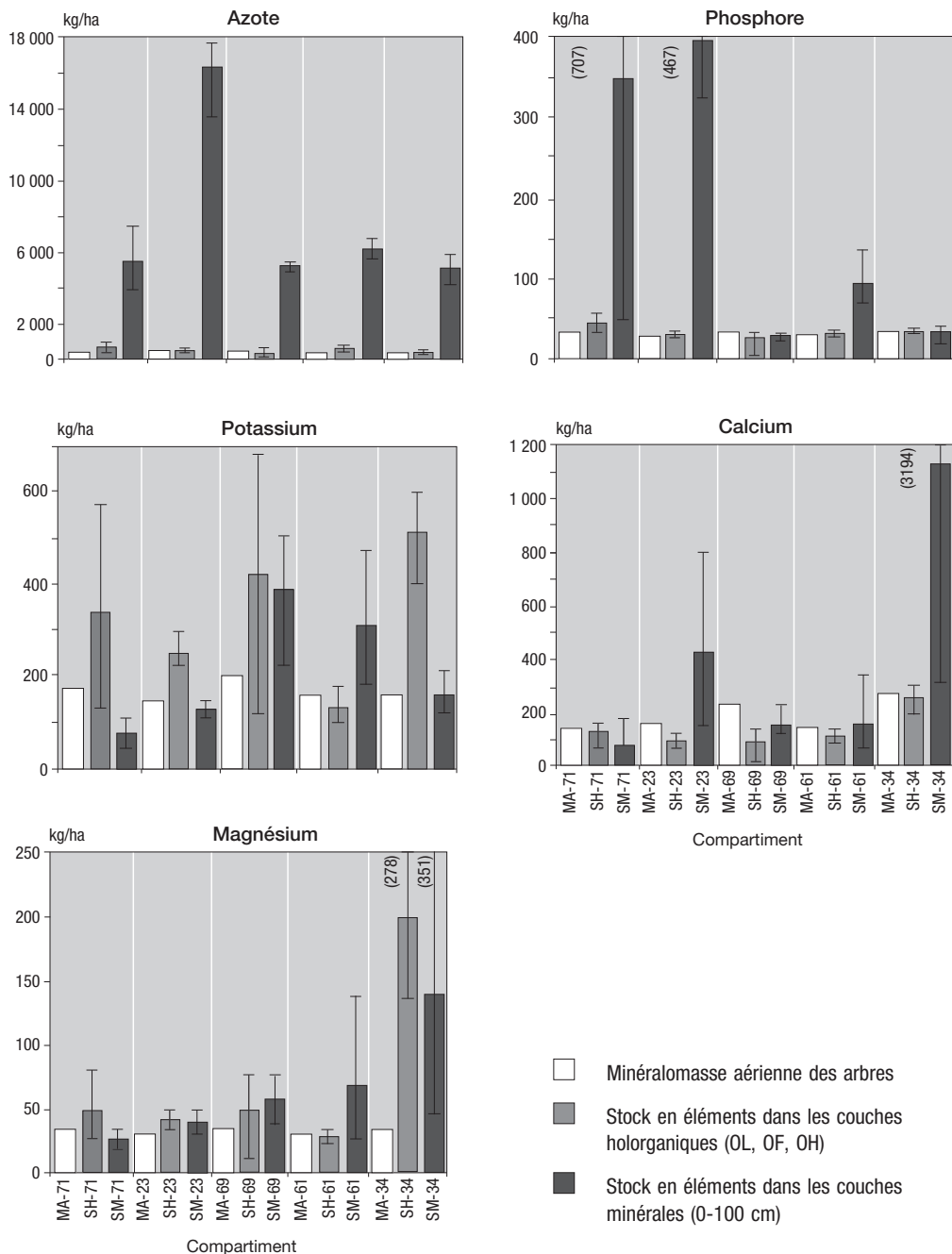
Élément	Compartiment	Peuplement									
		DOU 71		DOU 23		DOU 69		DOU 61		DOU 34	
		Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse	Minéralomasse
	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	(kg/ha)	(%)	
N	Bois de tronc	111,1	24,8	102,3	19,0	108,1	22,0	140,2	31,9	118,1	26,8
	Écorce de tronc	67,6	15,1	60,9	11,3	57,5	11,7	59,7	13,6	118,5	26,9
	Total tronc	178,7	39,9	163,2	30,3	165,6	33,7	200,0	45,5	236,5	53,7
	Bois des branches	74,7	16,7	90,8	16,9	87,7	17,9	78,8	17,9	77,7	17,6
	Aiguilles	194,9	43,5	283,8	52,8	237,3	48,4	161,2	36,6	126,2	28,7
	Total houppier	269,5	60,1	374,6	69,7	325,1	66,3	240,0	54,5	203,8	46,3
	Total arbre	448,2	100	537,8	100	490,7	100	440,0	100	440,4	100
P	Bois de tronc	4,9	14,6	3,8	13,8	3,8	11,0	5,4	19,1	8,0	23,7
	Écorce de tronc	6,4	19,0	4,3	15,6	5,7	16,4	5,3	18,9	10,6	31,3
	Total tronc	11,3	33,7	8,1	29,4	9,5	27,5	10,7	38,0	18,6	55,0
	Bois des branches	7,8	23,2	7,2	26,0	9,8	28,4	8,3	29,2	7,2	21,2
	Aiguilles	14,6	43,2	12,3	44,6	15,3	44,1	9,3	32,8	8,0	23,8
	Total houppier	22,4	66,3	19,5	70,6	25,1	72,5	17,5	62,0	15,2	45,0
	Total arbre	33,7	100	27,6	100	34,6	100	28,3	100	33,8	100
K	Bois de tronc	36,8	21,3	27,4	18,5	32,1	16,5	40,1	25,5	39,1	24,8
	Écorce de tronc	31,5	18,2	22,8	15,4	34,8	17,9	25,2	16,1	46,9	29,8
	Total tronc	68,3	39,5	50,2	33,9	66,8	34,4	65,3	41,5	86,0	54,5
	Bois des branches	38,8	22,4	39,0	26,3	49,5	25,5	48,1	30,6	32,9	20,9
	Aiguilles	65,9	38,1	59,0	39,8	77,9	40,1	43,8	27,8	38,8	24,6
	Total houppier	104,8	60,5	98,0	66,1	127,4	65,6	91,9	58,5	71,7	45,5
	Total arbre	173,1	100	148,2	100	194,2	100	157,2	100	157,7	100
Ca	Bois de tronc	24,9	18,5	23,2	14,9	25,8	10,8	27,3	20,1	62,3	23,4
	Écorce de tronc	20,0	14,9	23,4	15,0	30,7	12,9	16,8	12,4	82,8	31,1
	Total tronc	44,9	33,4	46,6	29,9	56,5	23,6	44,1	32,5	145,0	54,6
	Bois des branches	32,7	24,4	47,0	30,2	76,7	32,1	44,9	33,1	66,3	25,0
	Aiguilles	56,6	42,2	62,2	39,9	105,8	44,3	46,7	34,4	54,3	20,4
	Total houppier	89,3	66,6	109,3	70,1	182,4	76,4	91,6	67,5	120,6	45,4
	Total arbre	134,2	100	155,8	100	238,9	100	135,7	100	265,7	100
Mg	Bois de tronc	6,4	17,5	5,2	17,6	4,6	13,2	6,7	22,3	8,8	25,8
	Écorce de tronc	5,5	15,0	3,8	13,0	3,7	10,8	3,9	13,2	9,2	26,9
	Total tronc	11,8	32,5	9,0	30,6	8,3	24,0	10,6	35,5	18,1	52,6
	Bois des branches	8,9	24,4	8,0	27,1	9,3	26,8	8,4	28,3	7,2	21,0
	Aiguilles	15,6	43,0	12,5	42,3	17,0	49,2	10,8	36,2	9,1	26,4
	Total houppier	24,5	67,5	20,5	69,4	26,2	76,0	19,2	64,5	16,3	47,4
	Total arbre	36,3	100	29,5	100	34,5	100	29,8	100	34,3	100

Figure 1

STOCKS EN ÉLÉMENTS DANS DIVERS COMPARTIMENTS DE L'ÉCOSYSTÈME

MA : minéralomasse aérienne des arbres ;
 SH : stock en éléments dans les couches holorganiques du sol (OL, OF, OH)
 SM : stock en éléments dans les couches minérales du sol (0-100 cm)

Les barres représentent les valeurs moyennes, les barres d'erreurs indiquent les stocks en éléments minimaux et maximaux.



La variabilité inter-placette apparaît bien supérieure au niveau du sol qu'au niveau des minéralomasses aériennes. À titre d'illustration, le rapport entre les stocks d'azote maximum et minimum est d'environ 1,2 pour les arbres, comparativement à 3,1 pour les couches minérales. La variabilité intra-placette du stock d'éléments dans les couches holorganiques ou minérales des sols, parfois très élevée, s'explique par des différences de teneurs en éléments et/ou de poids de nécromasse ou de terre fine à l'hectare d'un point de prélèvement à l'autre.

La répartition des éléments entre les couches minérales du sol et les parties aériennes du peuplement varie selon l'élément et la placette. Pour l'azote, les stocks totaux des couches minérales dominent nettement les minéralomasses aériennes totales dans toutes les placettes. Pour les autres éléments (P, K, Ca, Mg), trois cas peuvent être individualisés si l'on compare les stocks d'éléments dans les couches minérales (SM) aux minéralomasses aériennes des arbres (MA) :

- SM min et max < MA,
- SM min et max \geq MA,
- SM min < MA et SM max \geq MA.

Le premier cas, qui pourrait refléter une susceptibilité du système à la perte d'éléments, n'est observé distinctement que pour K dans la placette DOU 71. Aucun élément (ni aucune placette) ne montre de figure commune à toutes les placettes (ou pour tous les éléments).

Les stocks en éléments des couches holorganiques sont loin d'être négligeables comparativement aux minéralomasses aériennes des peuplements : à l'exception du calcium dans les peuplements DOU 23, DOU 69 et DOU 61, le stock maximum par placette relevé dans les couches holorganiques est en effet supérieur aux minéralomasses aériennes pour tous les éléments et peuplements.

Le rapport entre stocks des couches holorganiques et stocks des couches minérales se révèle extrêmement variable selon l'élément (à placette fixée) et/ou selon la placette (à élément fixé). Que l'on considère les rapports min/min ou max/max, les stocks en azote des couches holorganiques ne dépassent pas 13 % des stocks des couches minérales, soit des valeurs souvent très nettement inférieures à celles relevées pour les autres éléments. Ceci s'explique en grande partie par la nature des pools d'éléments considérés dans les couches holorganiques et minérales, respectivement : éléments totaux dans les deux cas pour l'azote, totaux dans les couches holorganiques et extractibles dans les couches minérales pour les autres éléments.

À âge fixé (placettes DOU 71, DOU 23, DOU 69), aucune relation cohérente n'apparaît entre les stocks en éléments dans les couches minérales ou holorganiques et les minéralomasses aériennes des arbres, quel que soit l'élément considéré. Pour le potassium, par exemple, les stocks en éléments dans les couches minérales semblent nettement plus élevés dans la placette DOU 69 comparativement à la placette DOU 71, mais les minéralomasses dans les parties aériennes des deux peuplements sont comparables.

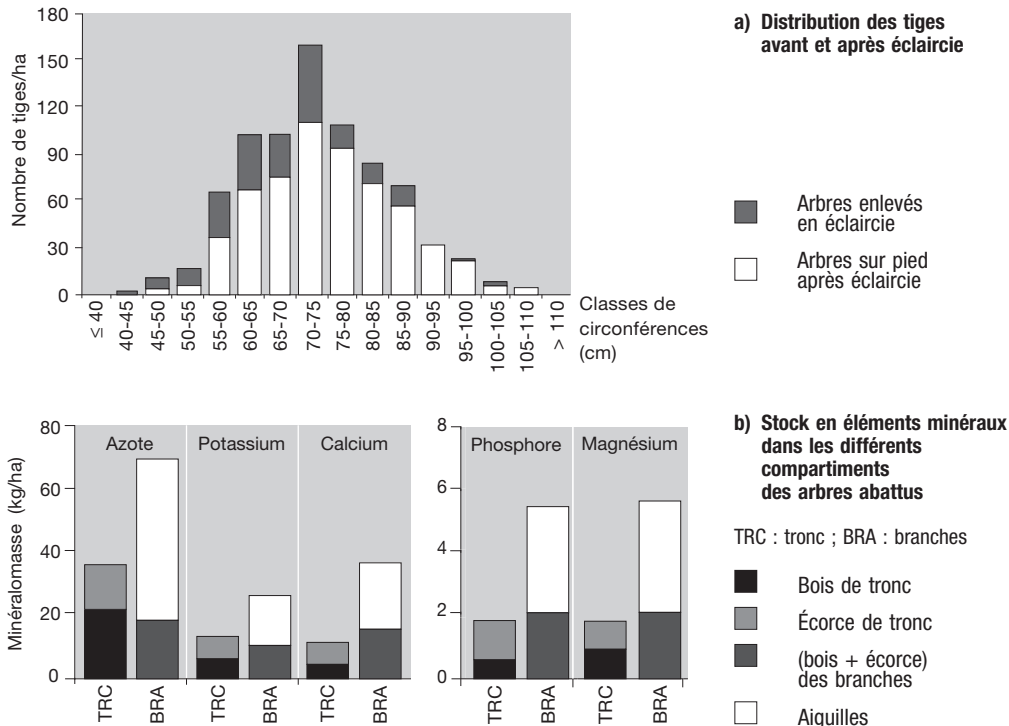
IMPLICATIONS PRATIQUES ET PERSPECTIVES

Exportation des éléments minéraux et éclaircies

Pour chaque peuplement, les régressions obtenues permettent d'évaluer dès à présent les exportations d'éléments minéraux associées à des éclaircies effectuées à un âge proche de celui auquel les équations ont été établies. Connaissant la distribution du diamètre des arbres éclaircis, il suffit en effet d'appliquer pour chaque arbre marqué l'(les) équation(s) correspondant à l'élément considéré et au(x) compartiment(s) exporté(s), et d'en cumuler les valeurs pour l'ensemble des arbres enlevés.

Figure 2

ÉCLAIRCIE DANS LE PEUPEMENT DOU 69 EN 1995



La figure 2 (ci-dessus) présente un exemple d'application en considérant une éclaircie effectuée dans la placette DOU 69. Cette éclaircie, réalisée fin 1995 dans le peuplement alors âgé de 27 ans, a ramené le nombre de tiges par hectare de 781 à 579 (figure 2a). Les exportations d'éléments minéraux par la récolte de la biomasse sont illustrées à la figure 2b en individualisant la contribution des différents compartiments.

Exportation des éléments minéraux et type d'exploitation

Le tableau VII (p. 124) montre clairement à quel point le type d'exploitation peut influencer le bilan en éléments minéraux du sol selon le(s) compartiment(s) effectivement exporté(s). Cette incidence apparaît également à la figure 2b, où les exportations d'éléments associées à la récolte des produits éclaircis ont été subdivisées en une composante liée au tronc (bois, écorce - "TRC"), et une composante liée aux branches (bois, aiguilles - "BRA").

La comparaison entre les éléments stockés dans le houppier et immobilisés dans le tronc mérite une attention particulière, les méthodes d'exploitation traditionnelles impliquant seulement l'exportation des troncs. Pour la placette DOU 34, la proportion de chaque élément dans les branches (bois + écorce + aiguilles) est toujours légèrement inférieure à 50 %. Pour les autres placettes, la proportion des éléments stockés dans les branches varie de 54 % (N, DOU 61) à 76 % (Ca, Mg - DOU 69) (tableau VII, p. 124). Malgré les concentrations moyennes nettement plus faibles dans le bois de tronc (tableau V, p. 122), la contribution de ce dernier compartiment à la minéralomasse

aérienne totale est loin d'être négligeable en raison de l'importance de la biomasse associée ; cette contribution tend à augmenter dans le peuplement le plus âgé (DOU 34).

Même si une partie de la biomasse exploitée reste sur la parcelle, les travaux préparatoires au reboisement — l'andainage notamment — peuvent conduire à une redistribution notable des éléments minéraux au sein de la placette. L'importance du stock en éléments associés aux parties ligneuses et aux aiguilles des branches peut être considérable, comme l'illustrent les résultats obtenus pour l'éclaircie considérée (figure 2b, catégorie "BRA").

Outre l'impact lié à l'exportation ou à la redistribution d'éléments minéraux associée aux coupes, les interventions sylvicoles peuvent influencer le bilan en éléments minéraux du sol en affectant tout ou partie des flux d'entrées/sorties du système (Ranger et Bonneau, 1984), ou modifier directement les stocks d'éléments des sols — lors des travaux préparatoires à la plantation par exemple. Comme l'indique la figure 1 (p. 125), les éléments stockés dans les couches holograniques des sols représentent une importante source potentielle d'éléments assimilables par les plantes. Celle-ci doit donc être gérée de façon appropriée, pour assurer l'approvisionnement des arbres par une minéralisation contrôlée de la matière organique, tout en garantissant le maintien dans le système sol-plante des éléments libérés.

Exportation des éléments minéraux au cours de la révolution

Les équations développées pour chaque peuplement ne peuvent être utilisées telles quelles pour y évaluer le cumul des exportations en éléments minéraux sur l'ensemble de la révolution. Les trois raisons suivantes s'y opposent en effet :

- évolution des teneurs moyennes en éléments suivant l'âge des peuplements (Ranger *et al.*, 1997),
- domaine de validité des équations limité à la gamme de diamètres des arbres à 1,30 m ayant servi à leur établissement,
- distribution du diamètre des arbres éclaircis souvent inconnue lors de la première coupe.

Les points un et deux peuvent être pris en compte en utilisant des équations de régression développées pour un peuplement de même âge que celui du peuplement considéré ; il faut alors toutefois supposer que tous les autres facteurs sont rigoureusement identiques dans les deux cas (Ranger *et al.*, 1995). Les quantités d'éléments minéraux exportées en première éclaircie (point trois) peuvent être évaluées grossièrement à partir du volume exploité (connu), d'une estimation de la densité apparente sèche [65 °C, (bois + écorce)] et d'une estimation des concentrations élémentaires moyennes (bois + écorce).

Perspectives

Les régressions utilisées pour estimer les biomasses (tableau VI, p. 123) et minéralomasses (tableau VII, p. 124) dans les cinq peuplements étudiés ont été établies placette par placette. Dans un souci de généralisation, il convient d'évaluer l'opportunité d'un modèle commun à l'ensemble des placettes ou à un sous-ensemble de celles-ci.

La validité d'un modèle commun peut être testée statistiquement en comparant les formes réduite (mêmes paramètres pour toutes les placettes) et complète (paramètres individuels pour chaque placette) de différents modèles (Ponette *et al.*, à paraître). L'opportunité d'adopter un modèle commun peut également être évaluée indépendamment du résultat de ces tests statistiques, en comparant les estimations obtenues par le meilleur modèle commun à celles issues des modèles individuels retenus. Les différences relatives — ((commun - individuel) / individuel) × 100 — observées pour les biomasses et minéralomasses du tronc peuvent varier considérablement suivant le para-

mètre étudié (à compartiment fixé) et selon le compartiment (à paramètre fixé) ; elles peuvent également varier sensiblement d'une placette à l'autre, à compartiment et paramètre fixés. À titre d'exemple, le tableau VIII (p. 130) reprend les résultats pour les minéralomasses d'azote dans le bois et l'écorce de tronc, les modèles statistiques correspondants étant rassemblés à l'annexe 2 (p. 133).

En première approximation, les quantités d'éléments stockées dans la biomasse peuvent être évaluées en tirant parti des relations simples parfois observées entre biomasses et minéralomasses d'un ou de plusieurs compartiments (Augusto *et al.*, 2000 et figure 3, ci-dessous). Il suffit alors

Figure 3 **RELATION ENTRE LA MINÉRALOMASSE DU TRONC (bois + écorce) ET SA BIOMASSE SÈCHE DANS DES PEUPLMENTS DE DOUGLAS**

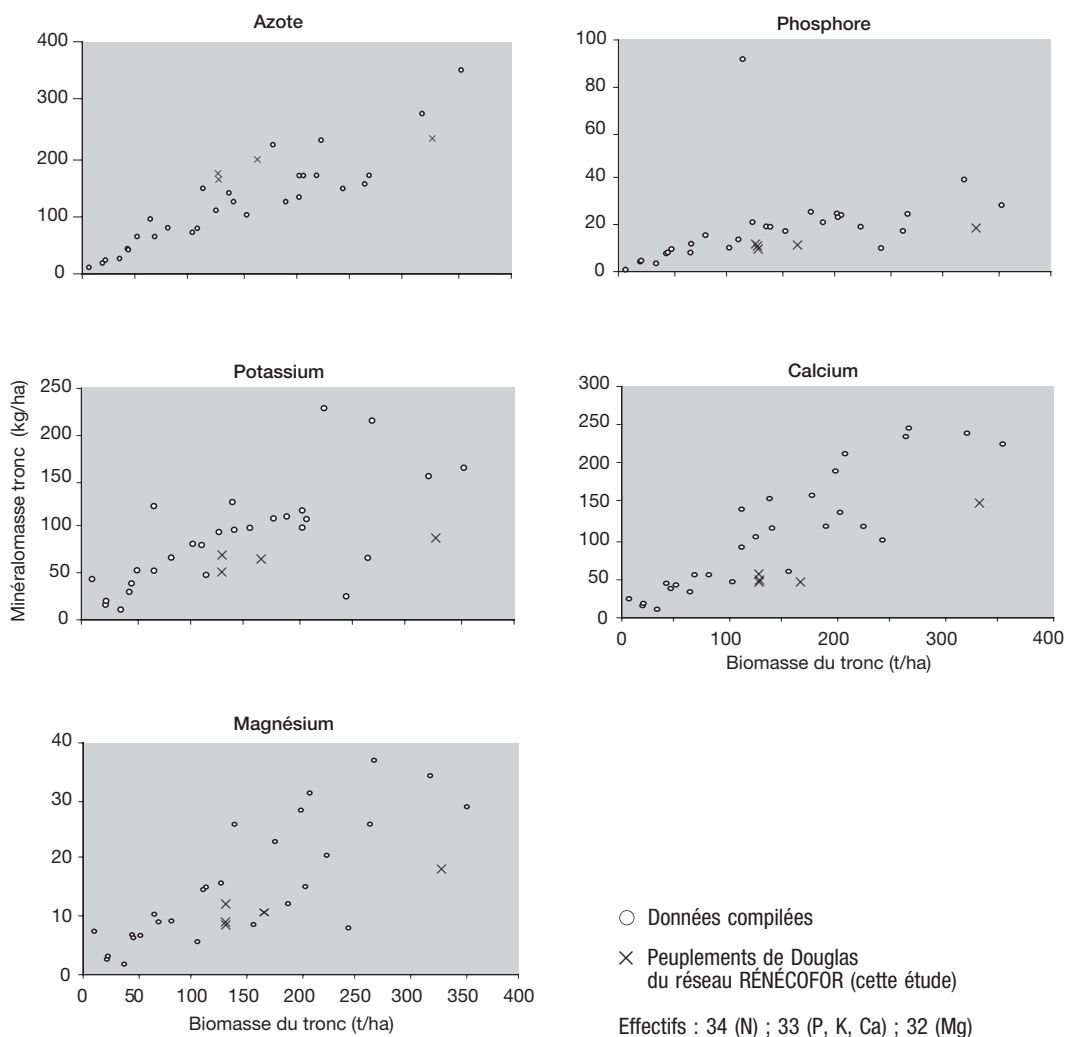


Tableau VIII **Estimations des minéralomasses d'azote pour le bois et l'écorce de tronc**
 Comparaison entre modèles individuels et communs

Placette	Bois du tronc			Écorce du tronc		
	Minéralomasse ⁽¹⁾ N (kg/ha)		Δ ⁽²⁾ (%)	Minéralomasse ⁽¹⁾ N (kg/ha)		Δ ⁽²⁾ (%)
	Individuel	Commun		Individuel	Commun	
DOU 23	102,3	116,8	14,2	60,9	60,2	-1,1
DOU 34	118,1	144,5	22,4	118,5	113,6	-4,1
DOU 61	140,2	108,0	-23,0	59,7	64,9	8,6
DOU 69	108,1	116,2	7,5	57,5	55,0	-4,3
DOU 71	111,1	106,3	-4,4	67,6	52,8	-21,9

(1) Modèles statistiques spécifiés à l'annexe 2 (p. 133).

(2) ((commun - individuel)/individuel) × 100.

d'estimer la biomasse du (des) compartiment (s) considéré (s) pour accéder à sa (leur) minéralomasse. Dans le cas d'une récolte des troncs par exemple, la biomasse exportée peut être évaluée facilement à partir du volume exploité (m³/ha) et de la densité apparente sèche (t/m³) du compartiment [(bois + écorce) de tronc] – soit environ 0,42 t/m³ pour le Douglas. Comme l'indique la figure 3 (p. 129), la qualité des relations entre biomasses et minéralomasses du tronc varie considérablement suivant l'élément considéré. Des études complémentaires sont nécessaires pour identifier les facteurs affectant ces relations (par exemple sylviculture, âge du peuplement, propriétés chimiques du sol...) et comprendre leurs influences relatives.

Les données collectées durant cette étude permettront également d'adapter un modèle de croissance du Douglas existant (Ottorini, 1991 ; 1995), en vue de quantifier les biomasses et minéralomasses à chaque stade de développement du peuplement. En permettant de simuler l'impact de scénarios sylvicoles variés sur la production volumique des peuplements et sur les exportations minérales correspondantes, cet outil constituera une aide précieuse pour la gestion à long terme des écosystèmes forestiers.

Quentin PONETTE
 Anciennement
 Ingénieur Chargé d'étude
 Équipe Cycles biogéochimiques
 INRA
 F-54280 CHAMPENOUX

Actuellement
 Enseignant-Chercheur
 Unité des Eaux et Forêts
 UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
 Place Croix-du-Sud, 2 – Boîte 9
 B-1348 LOUVAIN-LA-NEUVE (BELGIQUE)

Jacques RANGER
 Directeur de Recherches
 Équipe Cycles biogéochimiques
 INRA
 F-54280 CHAMPENOUX

Remerciements

Les auteurs remercient les forestiers responsables et suppléants locaux des placettes RÉNÉCOFOR, ainsi que les stagiaires du Département des Recherches techniques de l'Office national des Forêts pour l'aide apportée lors des prélèvements. La contribution du personnel technique et des stagiaires de l'équipe Cycles biogéochimiques de l'INRA-Nancy a également été appréciable à toutes les étapes de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES. — Référentiel pédologique. — Paris : INRA, 1995. — 332 p.
- AFNOR. — Qualité des sols, méthodes d'analyse. — Paris : AFNOR, 1987.
- AFOCEL. — Le Douglas. — Paris : AFOCEL, 1997. — 416 p.
- AUGUSTO (L.), RANGER (J.), PONETTE (Q.), RAPP (M.). — Relationships between forest tree species, stand production and stand nutrient amount. — *Annals of Forest Science*, vol. 57, 2000, pp. 313-324.
- BADEAU (V.). — Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. — *Les Cahiers du DSF*, n° 5, 1998. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - DERF - Département de la Santé des Forêts, 1998. — 211 p.
- BADEAU (V.), DAMBRINE (E.), WALTER (C.). — Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. — *Étude et Gestion des Sols*, vol. 6, n° 3, 1999, pp. 165-179.
- BADEAU (V.), ULRICH (E.). — Pourquoi les sols du réseau intensif RÉNÉCOFOR sont-ils nettement plus acides que ceux du réseau de surveillance systématique (16 × 16 km) ? *In* : La santé des forêts (France) en 1997. — *Les Cahiers du DSF*, n° 1, 1998, pp. 81-83. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche - DERF - Département de la Santé des Forêts, 1998. — 108 p.
- BARTELINK (H.H.). — Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. — *Forest Ecology and Management*, vol. 86, 1996, pp. 193-203.
- BONNEAU (M.). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Théorie, bases du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales. — Nancy : ENGREF, 1995. — 367 p.
- BRÊTHES (A.), ULRICH (E.) coordinateurs. — RÉNÉCOFOR - Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1997. — 573 p. (ISBN 2-84207-112-3).
- CLUZEAU (C.), ULRICH (E.), LANIER (M.), GARNIER (F.). — RÉNÉCOFOR - Interprétation des mesures dendrométriques de 1991 à 1995 des 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1998. — 309 p. (ISBN 2-84207-151-4).
- DÉCOURT (N.), VANNIÈRE (B.). — Tables de production pour les forêts françaises. — Nancy : ENGREF, 1984. — 160 p.
- JABIOL (B.), BRÊTHES (A.), PONGE (J.-F.), TOUTAIN (F.), BRUN (J.-J.). — L'Humus sous toutes ses formes. — Nancy : ENGREF, 1995. — 63 p.
- KERSHAW (J.A. Jr), MAGUIRE (D.A.). — Crown structure in western hemlock, Douglas-fir, and grand fir in western Washington : trends in branch-level mass and leaf area. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 25, 1995, pp. 1897-1912.
- LEBOURGEOIS (F.). — RÉNÉCOFOR - Étude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1997. — 307 p. (ISBN 2-84207-075-5).
- MARQUES (R.), RANGER (J.), GELHAYE (D.), POLLIER (B.), PONETTE (Q.), GOEDERT (O.). — Comparison of chemical composition of soil solutions collected by zero-tension plate lysimeters with those from ceramic-cup lysimeters in a forest soil. — *European Journal of Soil Science*, vol. 47, 1996, pp. 407-417.
- MÉTÉO-FRANCE. — Normales climatiques, période 1961-1990. Tome 1 - stations de métropole. — Trappes : Météo-France, 1996.
- OFFICE NATIONAL DES FORÊTS (ONF). Département des Recherches techniques. — Notice de présentation du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers. — Fontainebleau : Office national des Forêts, 1996. — 38 p. (ISBN 2-84207-021-6).
- OTTORINI (J.-M.). — Growth and development of individual Douglas-fir in stands for applications to simulation in silviculture. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 48, 1991, pp. 651-666.

Q. PONETTE - J. RANGER

- OTTORINI (J.-M.). — Simulation et sylviculture du Douglas. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° spécial "Modélisation de la croissance des arbres forestiers et de la qualité des bois", 1995, pp. 97-105.
- PONCE (R.), ULRICH (E.), GARNIER (F.). — RÉNÉCOFOR - Essai de synthèse sur l'histoire des 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1998. — 237 p. (ISBN 2-84207-133-6).
- PONETTE (Q.), RANGER (J.), OTTORINI (J.-M.), ULRICH (E.). — Aboveground biomass and nutrient content of five Douglas-fir stands in France. — *Forest Ecology and Management*, à paraître.
- PONETTE (Q.), ULRICH (B.), BRÊTHES (A.), BONNEAU (M.), LANIER (M.). — RÉNÉCOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau. — Fontainebleau : Office national des Forêts - Département des Recherches techniques, 1997. — 427 p. (ISBN 2-84207-100-X).
- RANGER (J.), BONNEAU (M.). — Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt. — *Revue forestière française*, vol XXXVI, n° 2, 1984, pp. 93-112.
- RANGER (J.), MARQUES (R.), COLIN-BELGRAND (M.), FLAMMANG (N.), GELHAYE (D.). — The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stand studied using a chronosequence approach. — *Forest Ecology and Management*, vol. 72, 1995, pp. 167-183.
- RANGER (J.), MARQUES (R.), COLIN-BELGRAND (M.). — Nutrient dynamics during the development of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stand. — *Acta Oecologica*, vol. 18, n° 2, 1997, pp. 73-90.
- ULRICH (E.). — Le Réseau RÉNÉCOFOR : objectifs et réalisation. — *Revue forestière française*, vol XLVII, n° 2, 1995, pp. 107-124.

ANNEXE 1

MODÈLES STATISTIQUES SÉLECTIONNÉS ET TESTÉS

Niveau	Modèle	Équation	Références
Branche	(1)	$Y = a + (b \times D10^2)$	Bartelink, 1996 Kershaw et Maguire, 1995 Kershaw et Maguire, 1995 Kershaw et Maguire, 1995
	(2)*	$Y = a + (b \times D10) + (c \times D10^2)$	
	(3)*	$Y = a \times D10^2$	
	(4)*	$Y = (a \times D10) + (b \times D10^2)$	
	(5)	$Y = (a \times D10^2) + b \times (D10^2 \times HREL \times (1 - HREL))$	
	(6)*	$\ln Y = a + (b \times \ln D10)$	
	(7)	$\ln Y = a + (b \times \ln D10) + (c \times \ln DINC)$	
	(8)	$\ln Y = a + (b \times \ln D10) + (c \times \ln DINC) + (d \times \ln RelHACB)$	
	(9)*	$Y = a \times D10^b$	
Tronc, houppier	(10)*	$Y = a + (b \times DBH^2)$	
	(11)*	$Y = a + (b \times DBH) + (c \times DBH^2)$	
	(12)*	$Y = a \times DBH^2$	
	(13)*	$Y = (a \times DBH) + (b \times DBH^2)$	
	(14)*	$\ln Y = a + (b \times \ln DBH)$	
	(15)*	$Y = a \times DBH^b$	

Y représente la biomasse ou la minéralomasse au niveau "branche" (bois, aiguilles), ainsi qu'aux niveaux "tronc" (bois, écorce) ou "houppier" (bois, aiguilles). Les unités pour les biomasses sont des (kg), sauf pour le bois et les aiguilles au niveau "branche" (g); les minéralomasses sont exprimées en (g).

D10 (mm) : diamètre des branches à 10 cm du point d'insertion sur le tronc.

DINC (m) : hauteur totale de l'arbre moins hauteur de la branche.

HREL : hauteur au-dessus de la base du houppier divisée par la longueur du houppier, i.e. $(1 - (DINC/CL))$ où CL (m) est la longueur du houppier.

RelHACB : $(1,1 - (DINC/CL))$. La variable RelHACB est semblable à HREL si ce n'est qu'elle est basée sur un rapport maximum de 1,1 pour éviter tout problème de calcul avec les modèles logarithmiques.

DHB (cm) : diamètre des arbres à 1,30 m.

(*) Indique une équation utilisée effectivement.

ANNEXE 2 ESTIMATIONS DES MINÉRALOMASSES D'AZOTE POUR LE BOIS ET L'ÉCORCE DE TRONC.
MODÈLES STATISTIQUES

Compartiment	Placette	Modèle ⁽¹⁾ N°	Paramètres				R ² ajusté	SSE ⁽²⁾	n
			a	b	c	λ			
Bois – tronc	Modèles individuels								
	DOU 23	11	129,823	-14,319	0,563		0,904	39641,6	14
	DOU 34	11	345,546	-19,413	0,431		0,971	25024,4	14
	DOU 61	13	1,627	0,282			0,976	63091,0	14
	DOU 69	11	-323,826	22,825	-0,143		0,757	37688,8	14
	DOU 71	12	0,277				0,975	23457,6	14
	Modèle commun ⁽³⁾								
DOU	11 ⁽⁵⁾	-61,164	5,566	0,148	1,0	0,929	389,02	70	
Écorce – tronc	Modèles individuels								
	DOU 23	15	0,228	1,848			0,959	3254,9	14
	DOU 34	11	365,129	-19,191	0,419		0,943	46096,4	14
	DOU 61	11	-140,456	9,070	8,39 10 ⁻⁴		0,947	3892,8	14
	DOU 69	10	-17,225	0,155			0,944	3005,0	14
	DOU 71	11	-41,576	4,457	0,063		0,935	5141,4	14
	Modèle commun ⁽⁴⁾								
DOU	11	116,194	-9,877	0,328		0,954	120175,6	70	

(1) Consulter l'annexe 1 (p. 132).

(2) Pour les unités, se référer à l'annexe 1 (p. 132).

(3) Modèle commun réduit rejeté aux niveaux $\alpha=0,05$ et $\alpha=0,01$.

(4) Modèle commun réduit rejeté aux niveaux $\alpha=0,05$ et $\alpha=0,01$.

(5) Modèle transformé en divisant l'équation correspondante par (DBH^2) où DBH (cm) : diamètre des arbres à 1,30 m.

BIOMASSES ET MINÉRALOMASSES AÉRIENNES DE CINQ PEUPELEMENTS DE DOUGLAS DU RÉSEAU RÉNÉCOFOR : QUANTIFICATION ET IMPLICATIONS SYLVICOLES (Résumé)

Les biomasses et minéralomasses aériennes (N, P, K, Ca, Mg) des arbres ont été évaluées dans cinq peuplements de Douglas [*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco] du Réseau National de suivi à long terme des ÉCOsystèmes FORestiers, en individualisant les quatre compartiments suivants : bois de tronc, écorce de tronc, (bois + écorce) des branches vivantes, aiguilles. Les stocks en éléments dans les couches holorganiques (OL, OF, OH) et minérales (0–100 cm) des sols ont également été quantifiés et mis en relation avec les minéralomasses aériennes des arbres.

Les résultats obtenus permettent de dégager un certain nombre d'implications sylvicoles en vue d'une gestion optimale du stock en éléments minéraux des sols forestiers, et de proposer des méthodes d'évaluation des minéralomasses utilisables par le praticien.

THE BIOMASS AND NUTRIENT CONTENTS OF THE AERIAL PARTS OF FIVE DOUGLAS-FIR STANDS IN THE RENECOFOR NETWORK: QUANTIFICATION AND SILVICULTURAL IMPLICATIONS (Abstract)

Aerial biomasses and nutrient contents (N, P, K, Ca, Mg) of trees have been evaluated in five Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco) stands of the French long-term monitoring network (REseau National de suivi à long terme des ECosystèmes FORestiers), taking into account the following four components: stemwood, stembark, branchwood (wood + bark), needles. The nutrient contents of the organic (OL, OF, OH) and mineral (0–100 cm) soil layers have also been quantified and compared to the aerial nutrient contents of the trees.

Practical implications are drawn from the results for optimal management of the nutrient pool in forest ecosystems; some tools are also given to the forester to estimate the nutrient contents of forest stands from easily-measured tree variables such as diameter at breast height.
