



HAL
open science

Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. II - Les effets de la sylviculture

Jacques Ranger, Maurice Bonneau

► **To cite this version:**

Jacques Ranger, Maurice Bonneau. Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. II - Les effets de la sylviculture. *Revue forestière française*, 1986, 38 (2), pp.105-123. 10.4267/2042/25628 . hal-03423819

HAL Id: hal-03423819

<https://hal.science/hal-03423819v1>

Submitted on 10 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.

EFFETS PRÉVISIBLES DE L'INTENSIFICATION DE LA PRODUCTION ET DES RÉCOLTES SUR LA FERTILITÉ DES SOLS DE FORÊT

Les effets de la sylviculture (*)

J. RANGER - M. BONNEAU

Dans la première partie de cet article (Ranger et Bonneau, 1984), ont été exposées les grandes lignes du cycle biologique en forêt. Des exemples concrets ont été donnés ainsi que les valeurs usuelles des apports par l'atmosphère ou par l'altération des minéraux du sol, et les ordres de grandeur des pertes par drainage. Les valeurs annuelles de l'immobilisation des éléments dans les parties ligneuses de l'arbre ont été indiquées pour des futaies classiques.

Il avait été souligné, en conclusion, que seul le fonctionnement biologique des peuplements avait été considéré, sans faire aucune référence à la manière dont l'homme les exploite.

Dans le présent article par contre, l'accent sera mis surtout sur le phénomène d'**exportation**, c'est-à-dire sur la quantité de bioéléments stockés dans une partie quelconque de l'arbre, qui quitte l'écosystème forestier du fait de l'exploitation de la forêt. La connaissance de l'exportation relative à chaque élément est nécessaire à la prévision de l'évolution de la fertilité minérale du sol. La question posée est la suivante : « Compte tenu des apports naturels à l'écosystème forestier et des pertes spontanées qu'il subit fatalement (pertes par drainage), le type de culture et le mode d'exploitation envisagés conduisent-ils ou non à la réduction progressive du stock d'éléments assimilables du sol ? »

Il est bien évident en effet que, par rapport à une forêt vierge où les éléments incorporés dans le peuplement font fatalement retour au sol un jour, la gestion d'un peuplement en vue d'une production récoltée introduit un nouveau poste de pertes qui peut conduire à un bilan négatif.

Il est non moins clair que ces exportations dépendront de l'espèce cultivée, de son potentiel de production et de la conduite du peuplement, de la partie de la biomasse élaborée qui est récoltée et sortie de la forêt, et de l'âge auquel est pratiquée la récolte.

Autant de questions et de problèmes qui sont examinés dans ce qui suit.

(*) La première partie de cet article a été publiée dans le n° 2, 1984 de la *Revue forestière française*, pp. 93-112.

INFLUENCE DU MATÉRIEL VÉGÉTAL CULTIVÉ SUR LES EXPORTATIONS

Par matériel végétal, on entend ici essentiellement l'espèce, sans ignorer que les variations infraspécifiques naturelles ou induites par l'amélioration génétique peuvent jouer un rôle très important.

Différentes essences, placées dans des conditions écologiques identiques, peuvent croître à des vitesses très différentes et donc fournir, à un âge donné, des récoltes de matière sèche très inégales en tonnage et donc en contenu d'éléments minéraux. En outre, la composition du bois et des différentes parties de l'arbre peut varier assez considérablement d'une essence à l'autre. Par exemple, le bois, l'écorce et les branches du Chêne sont assez riches en azote, le Peuplier 1214 a de fortes teneurs en potassium ; le bois des résineux contient peu de phosphore et de potassium, et l'écorce d'Eucalyptus est particulièrement riche en phosphore (nous avons réuni quelques résultats en annexe I, page 120).

La combinaison des différences de production et de composition conduit, pour des durées identiques, à des accumulations d'éléments minéraux très différentes. On en trouvera quelques exemples dans le tableau I. Le Pin sylvestre exporte, par son bois et ses écorces, beaucoup moins que l'Épicéa (N, K, Ca) ; le Hêtre, au contraire, malgré une production en volume moindre que l'Épicéa, exporte davantage d'azote, de phosphore et de potassium, mais un peu moins de calcium. Entre le Hêtre et le Pin sylvestre, l'écart est presque du simple au double pour l'azote, le phosphore et le potassium.

Le tableau II indique pour une durée de 31 ans, pour quatre peuplements, des exportations par le bois et l'écorce de tronc, très différentes. Le Douglas, comparé au Pin laricio, se signale par ses faibles exigences en potassium. Le taillis de Chêne, Bouleau et Sorbier, malgré une faible productivité, est par rapport aux résineux, un fort exportateur d'azote et de calcium, bien que cultivé sur un sol très acide (il est vrai que les tiges sont de plus petit diamètre, avec une plus forte proportion d'écorce). Par contre, sur des sols très voisins, un taillis-sous-futaie à réserves de Chêne se révèle beaucoup plus faible exportateur que le taillis simple ; tandis que l'Épicéa, certes beaucoup plus productif en biomasse, retire du sol forestier des quantités très supérieures d'éléments biogènes, à l'exception du phosphore.

La consommation d'azote par tonne de bois de tronc avec écorce est de l'ordre de 1 kg, quelle que soit l'essence, sauf pour le taillis simple où elle dépasse 5 kg. Les écarts sont, par contre, très forts pour les autres éléments. Pour le phosphore, par exemple, elle varie de 0,1 kg par tonne à presque 0,5 kg, les feuillus, et particulièrement le taillis, étant les plus forts exportateurs. Il en est de même pour le potassium dont les quantités par tonne s'échelonnent de 0,55 à 2 kg. L'exportation de calcium atteint presque 7 kg par tonne pour le taillis et pour la futaie de Chêne rouge, de Tulipier et d'Hickory, alors qu'elle ne dépasse guère 1 kg par tonne pour les autres peuplements.

INFLUENCE DE L'INTENSITÉ D'EXPLOITATION

Suivant les époques, les modes d'exploitation ont beaucoup varié. Il y a quelques années, on se contentait souvent de sortir les troncs des arbres de futaie, avec ou sans écorce, et les bois forts des taillis, ces derniers étaient même partiellement laissés sur place. Ce n'est donc qu'une partie de la biomasse produite, la plus pauvre en éléments minéraux, qu'on exportait. Par contre, avant la Seconde Guerre mondiale, en forêt feuillue tout au moins, les exploitations dites « traditionnelles » portaient sur la quasi-totalité du peuplement ; les houppiers des arbres de futaie étaient débités en bois de feu, à l'exception des branches les plus fines, les perches des

Tableau I Quantités d'éléments (en kg/ha) exportées par la récolte de bois fort avec écorce pour des peuplements de classe I et IV ramenés à une révolution identique de 100 ans, y compris les bois enlevés en éclaircies
(adapté de Kreutzer, 1976)

	Azote	Phosphore	Potassium	Calcium	Magnésium
Classe I					
Epicéa (12,2 m ³ /ha/an)	600	52	375	712	95
Pin sylvestre (6,2 m ³ /ha/an)	423	47	277	492	78
Hêtre (8,9 m ³ /ha/an)	893	107	478	693	117
Classe IV					
Epicéa (5,6 m ³ /ha/an)	270	25	180	340	45
Pin sylvestre (3,2 m ³ /ha/an)	193	21	121	221	34
Hêtre (4,1 m ³ /ha/an)	331	40	231	292	49

Tableau II Exportations (en kg/ha) par les bois et écorce de tronc pour une fraction de révolution de 31 ans. Données obtenues par extrapolation à partir des espèces suivantes : Pin 18 ans, taillis 31 ans, Douglas 30 ans, Tulipier 40 ans, taillis-sous-futaie à taillis de 30 ans, Epicéa 50 ans

	MS en t/ha	N	P	K	Ca	Mg
Pin laricio non fertilisé (Ranger, 1981)	91	100	6	114	81	21
Pin laricio fertilisé (idem)	177	213	26	227	217	52
Taillis simple des Ardennes primaires (Bouchon et al., 1985)	21	114	8	45	141	9
Douglas (Turner, 1981)	120	108	16	83	100	—
Futaie de Tulipier, Chêne rouge et Hickory (Johnson et al., 1982)	103	186	12	70	705	—
Taillis-sous-futaie (Nys et al., 1982)	39	51	5	27	50	5
Epicéa (idem)	103	111	3	57	120	16

taillis étaient entièrement façonnées en rondins, charbonnette ou fagots. Dans le cas des taillis et taillis-sous-futaie notamment, l'exportation portait donc, pour une part non négligeable, sur des bois de faible diamètre à forte proportion d'écorce.

Les méthodes modernes « d'exploitation de l'arbre entier » ne sont donc révolutionnaires que dans la mesure où elles concernent aussi les futaies résineuses, dans lesquelles n'étaient jusqu'à maintenant prélevés que les troncs, souvent d'ailleurs écorcés en forêt. Et on va même, dans certains cas, jusqu'à la récolte des aiguilles et des souches.

Quoiqu'il en soit, l'exploitation de la quasi-totalité de la biomasse produite, de type ancien ou moderne, conduit à augmenter la récolte des compartiments les plus riches des peuplements, et donc à accroître fortement l'exportation totale d'éléments minéraux.

L'annexe I montre, en effet, que les teneurs des écorces du tronc en azote sont quatre à huit fois plus élevées que celles du bois ; le rapport varie de 1 à 7 pour le potassium, de 3 à 10 pour

le phosphore. L'ensemble bois + écorce des branches vivantes a des concentrations en éléments biogènes équivalentes à celles de l'écorce du tronc. Même si ces compartiments ne représentent qu'une faible partie de la biomasse, la minéralomasse correspondante est loin d'être négligeable. C'est encore plus vrai si l'on envisage l'exportation de feuilles ou d'aiguilles, très riches en nutriments.

Le tableau III donne, pour des peuplements de Hêtre, d'Épicéa et de Pin sylvestre de classe I et IV, les exportations moyennes annuelles d'éléments pour une révolution, suivant qu'on pratique une exploitation plus ou moins complète (Kreutzer, 1976). La revue bibliographique de Cole et Rapp (1981) apporte des indications similaires et complémentaires.

Il est intéressant de prendre conscience de la très forte exportation de matière minérale entraînée par la récolte des écorces et des branches.

Le supplément d'exportation entraîné par la récolte de l'écorce du tronc varie de 30 à 150 % pour l'azote, le phosphore, le potassium et le magnésium.

En valeur absolue, ce supplément est de l'ordre de 1 à 2 kg par hectare et par an d'azote et de potassium, parfois plus, soit, en tenant compte du fait que ce supplément est moindre pour les peuplements âgés, une centaine de kg/ha pour une révolution (équivalent argent au prix actuel des engrais 750 F/ha), mais il peut aller jusqu'à 250 kg d'azote et 200 kg de potassium pour une futaie de Pin sylvestre de classe I (tableau III), ce qui représente une valeur de 1 750 F.

L'écorçage en forêt présenterait donc, dans les sols pauvres, un grand intérêt biologique, mais sa rentabilité financière est problématique et dépend beaucoup de l'essence et des possibilités de mécanisation. Lorsque l'écorce a une valeur marchande, il serait sans doute préférable, économiquement, de l'exporter et d'apporter des engrais en compensation.

L'exportation des branches en plus du tronc non écorcé correspond à une augmentation relative plus faible que celle due à la récolte des écorces. Elle dépend plus de l'architecture de l'arbre que de l'élément considéré. Elle est assez élevée pour certains résineux. Si, pour ces derniers, on envisage la récolte des aiguilles en même temps que celle des branches, on arrive à des suppléments d'exportations importants, de l'ordre du millier de kg d'azote, 500 kg de potassium, 100 kg de phosphore pour une pessière de classe I, pour un gain faible de biomasse. Dans une hêtraie de classe I dont on récolterait les branches non feuillées, on exporterait, en supplément des éléments contenus dans les troncs avec écorce, 360 kg d'azote, 150 kg de potassium et 30 kg de phosphore, pour un gain en biomasse nettement plus important que dans le cas des résineux. Si la récolte des branches peut se justifier pour certains feuillus, elle mérite d'être discutée pour les conifères, surtout si on enlève en même temps les aiguilles.

La récolte des souches, par contre, qui peut avoir un intérêt pour la préparation du sol, en vue d'une régénération artificielle, paraît plus acceptable car elle ne correspond qu'à une assez faible exportation supplémentaire d'éléments minéraux : 5 à 10 % pour N et P, 10 % pour K, Ca et Mg.

Le tableau IV donne un aperçu des répartitions moyennes de la biomasse et des divers éléments biogènes entre les grands compartiments des peuplements pour les feuillus et pour les résineux. Il confirme pleinement les lignes précédentes : la récolte des branches et des aiguilles de résineux correspond à un doublement ou à un triplement de la minéralomasse exportée, pour un gain de 28 % seulement en biomasse, tandis que pour les feuillus les « coûts » relatifs en minéralomasse sont du même ordre que le tonnage supplémentaire récolté.

Le brûlage sur coupe des branchages permet la restitution au sol du calcium, du potassium et du magnésium, mais entraîne la perte de l'azote qu'ils contiennent. Mieux vaut donc les laisser se décomposer sur place s'ils ne sont pas gênants sur le plan sylvicole.

Tableau III **Exportations moyennes (en kg/ha/an) de N, P, K, Ca, Mg pour l'ensemble de la révolution pour 2 classes de production et pour 3 types d'exploitation :**
 a) bois fort écorcé ; b) bois fort non écorcé ;
 c) bois fort, branches, avec écorces et feuillages (sauf pour le Hêtre)
 (d'après Kreutzer, 1976)

Espèce, classe et révolution	Production moyenne bois fort (m ³ /ha/an)	Azote			Phosphore			Potassium			Calcium			Magnésium		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Epicéa classe I - 80 ans	12,2	3,6	6,0	18,6	0,23	0,53	1,94	2,3	3,7	9,5	3,9	7,1	10,9	0,70	0,95	2,06
Epicéa classe IV - 100 ans	5,6	1,6	2,7	9,7	0,10	0,25	1,09	1,0	1,8	4,8	1,7	3,4	5,8	0,33	0,45	1,16
Pin sylvestre classe I - 130 ans	6,2	2,2	4,2	8,6	0,15	0,47	0,97	1,4	2,8	5,2	2,1	4,9	6,8	0,52	0,78	1,26
Pin sylvestre classe IV - 140 ans	3,2	1,0	1,9	4,7	0,07	0,21	0,53	0,6	1,2	2,8	0,9	2,2	3,2	0,23	0,34	0,64
Hêtre classe I - 140 ans	8,9	6,4	8,9	11,5	0,80	1,02	1,50	4,1	4,8	6,0	3,8	6,9	8,7	1,04	1,17	1,35
Hêtre classe IV - 130 ans	4,1	2,4	3,3	4,6	0,30	0,40	0,66	2,0	2,3	2,9	1,7	2,9	3,8	0,44	0,49	0,60

Tableau IV **Pourcentages moyens de matière sèche et de bioéléments majeurs par compartiment pour quelques peuplements de climat tempéré**

	MS	N	P	K	Ca
RÉSINEUX :					
Feuilles	8	36	37	32	20
Branches	14	29	27	26	28
Troncs (écorce + bois)	78	35	36	42	52
FEUILLUS :					
Feuilles	2	15	12	13	5
Branches	30	40	41	33	40
Troncs (écorce + bois)	68	45	47	54	55

L'andainage des rémanents, qui se pratique fréquemment dans les régénérations artificielles, est sur le plan de la minéralomasse presque l'équivalent d'une exploitation totale : les zones situées entre les andains sont fortement appauvries tandis que le sol qui se trouve sous les andains eux-mêmes s'enrichit. Si les andains sont étroits et rapprochés et si l'essence introduite a un fort dynamisme racinaire, on peut penser que le nouveau peuplement profitera au bout de quelques années de cette richesse. S'ils sont distants et larges, ce ne sera pas le cas, comme le montre la figure 1 (Ballard, 1972). L'andainage a d'ailleurs d'autres inconvénients : tassement du sol et élimination de la couche d'humus superficielle.

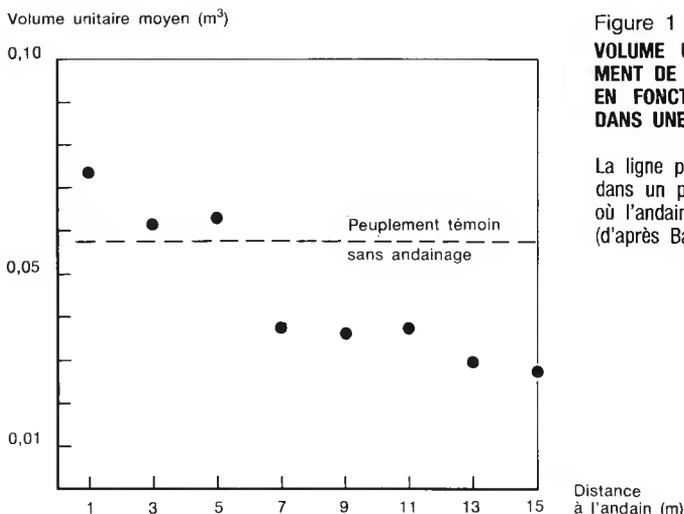


Figure 1
VOLUME UNITAIRE DES ARBRES D'UN PEUPEMENT DE *PINUS RADIATA* EN NOUVELLE-ZÉLANDE EN FONCTION DE LA DISTANCE AUX ANDAINS DANS UNE STATION PAUVRE.

La ligne pointillée indique le volume unitaire moyen dans un peuplement voisin, sur une même station, où l'andainage n'a pas été pratiqué. (d'après Ballard, 1972).

EFFET DU RACCOURCISSEMENT DES RÉVOLUTIONS

Une des tendances actuelles de l'aménagement forestier consiste en un raccourcissement de la révolution, directement avec une récolte précoce (en conservant la même essence), ou indirectement lors des substitutions d'essences.

C'est une stratégie d'aménagement qui a des répercussions importantes sur l'évolution de la fertilité des sols forestiers : il est cependant nécessaire de faire des nuances entre le passage aux révolutions moyennes (40 à 50 ans) et l'adoption des révolutions très courtes (10 ans).

Les conséquences du raccourcissement des révolutions sur la fertilité du sol sont de deux ordres :

- des effets directs liés à l'exportation des bioéléments ;
- des effets indirects liés à la fréquence des interventions pour la récolte et pour la préparation du terrain en vue de la régénération.

Les conséquences directes

En révolution moyenne (nous ne parlerons ici que du cas simple d'une diminution de la longueur des rotations en conservant la même espèce et les mêmes méthodes de gestion sylvicole, le cas du raccourcissement lié à la substitution d'espèces a été abordé au paragraphe précédent).

Le tableau V donne deux exemples d'exportation minérale quand on diminue de moitié la longueur de la révolution. Dans les deux exemples, pour N, P et K qui sont souvent des éléments limitants de l'alimentation de nos forêts, on s'aperçoit que l'exportation supplémentaire liée à la récolte de peuplements plus jeunes est très importante, entre 50 et 70 % pour l'Épicéa commun, et entre 30 et 50 % pour *Pinus taeda*. L'accumulation du calcium en fonction de l'âge semble par contre beaucoup plus linéaire et, de ce fait (dans cet exemple), l'exportation de cet élément est peu dépendante de l'âge d'exploitation. La conjugaison de deux phénomènes explique que plus on exploite des peuplements jeunes, plus on exporte d'éléments, à savoir :

a/ La proportion des divers compartiments change nettement avec l'âge, et l'annexe I montre que le bois de tige est beaucoup moins minéralisé que le reste de la biomasse.

Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt

L'exemple représenté sur la figure 2, d'après les données de Magdwick et al. (1977) pour une série de peuplements de *Pinus radiata* est très démonstratif à cet égard, puisque, par exemple, les aiguilles qui représentent 22 % de la biomasse totale à 6 ans ne représentent plus que 3 % de celle-ci à 22 ans ; à l'inverse, le tronc passe de 49 % à 6 ans à 87 % à 22 ans.

b/ La concentration en éléments minéraux des divers compartiments ligneux est d'autant plus élevée que le peuplement est plus jeune, pour la simple raison que la proportion de tissus fonctionnels riches en éléments est très élevée chez le végétal jeune.

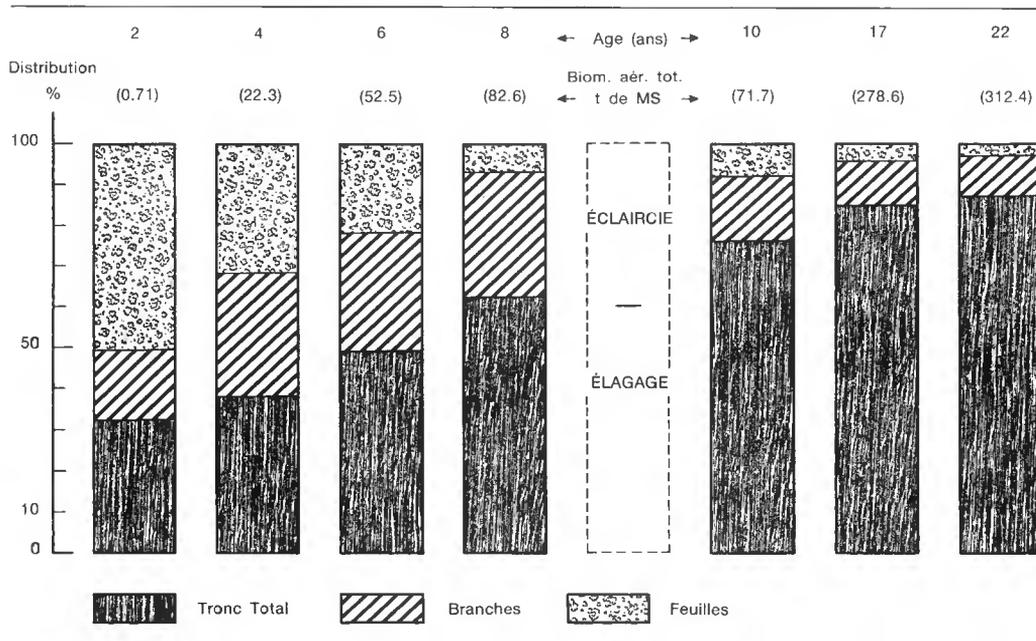
L'annexe II concernant la teneur en azote des divers compartiments de Peupliers hybrides et de *Pinus taeda* illustre clairement la liaison entre la teneur en cet élément d'un compartiment et l'âge de l'arbre, en particulier pour les compartiments susceptibles d'être récoltés (parties ligneuses).

Tableau V Exportations (en kg/ha) de bioéléments par la biomasse (y compris lors des éclaircies) en fonction de la longueur des rotations

		N	P	K	Ca
N° 1 <i>Picea abies</i> Classe IV (Krapfenbauer et Buchleitner, 1981)	1 rotation de 100 ans	565	65	310	895
	2 rotations de 50 ans	966	96	520	1 028
	Augment. relative (%)	(+ 71)	(+ 48)	(+ 68)	(+ 15)
N° 2 <i>Pinus taeda</i> (Switzer et Nelson, 1973)	1 rotation de 40 ans	245	24	149	165
	2 rotations de 20 ans	350	36	194	150
	Augment. relative (%)	(+ 43)	(+ 50)	(+ 30)	(- 9)

Figure 2

**DISTRIBUTION RELATIVE DE LA MATIÈRE SÈCHE
ENTRE LES PRINCIPAUX COMPARTIMENTS DE LA BIOMASSE AÉRIENNE**
(exemple de *Pinus radiata* d'après les données de Magdwick et al., 1977).



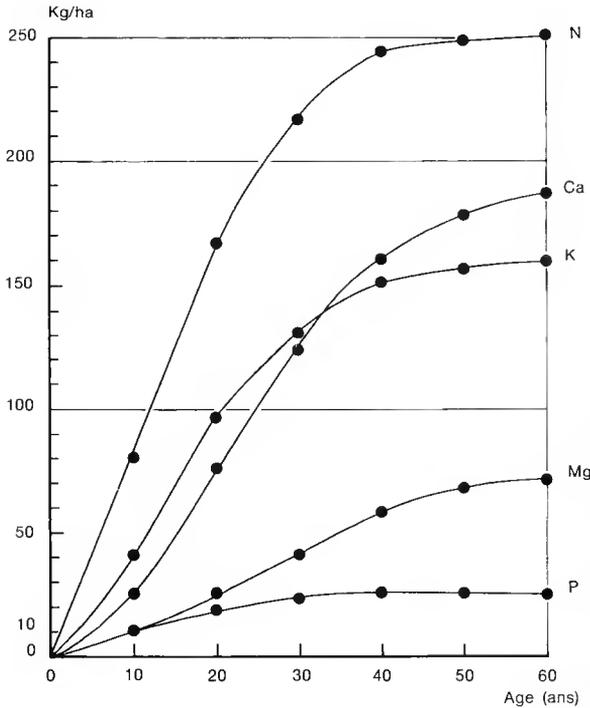


Figure 3
INCORPORATION DES BIOÉLÉMENTS EN FONCTION DU TEMPS
 (exemple de *Pinus taeda*
 d'après Switzer et Nelson, 1973)

Une autre manière d'exprimer ces résultats est d'étudier l'évolution de l'accumulation moyenne annuelle dans la biomasse en fonction de la longueur de la révolution (l'accumulation moyenne annuelle étant le rapport de la minéralomasse des compartiments exploités à l'âge du peuplement).

Si l'on traduit ces résultats graphiquement (figure 3) pour une série de peuplements de *Pinus taeda*, on observe que ce n'est que pour une durée de révolution d'au moins 50 ans que l'incorporation d'éléments se stabilise, ce qui signifie qu'à partir de cet âge, l'accroissement est quasiment gratuit en termes de bilan minéral pour l'écosystème.

Le changement de structure des peuplements et le cycle biogéochimique efficace des éléments expliquent ce phénomène. On note en particulier les valeurs élevées de l'incorporation moyenne annuelle pour tous les éléments minéraux quand la longueur des révolutions est inférieure à 20 ans.

En rotation très courte (inférieure à 10 ans), les effets précédents sont encore plus spectaculaires (récolte en phase juvénile, avec ce que cela implique pour les concentrations élevées et le rapport défavorable tronc/petits compartiments). Il s'agit, de plus, d'essences à fort potentiel de croissance juvénile qui sont en même temps les essences très exigeantes au plan édaphique. Dans ces cultures hautement mécanisées, tant au moment de la mise en place et des entretiens que de l'exploitation, il est probable que le taux de récolte de la biomasse produite sera très élevé ; certains auteurs pensent même à récolter les feuilles pour la nutrition du bétail (Anderson et Zsuffa, 1975).

Le tableau VI montre quel est le rapport entre le gain en biomasse et l'exportation qui en résulte pour les éléments (ici l'azote) ; les feuilles qui représentent 5 % de la biomasse, contiennent 34 % de l'azote de la minéralomasse aérienne !

Le tableau VII synthétise les exportations liées à la récolte de la biomasse de différentes essences sur une durée théorique de culture de 140 ans (révolution classique de la futaie de Hêtre servant de référence) en imaginant qu'on les cultive sur les mêmes stations.

L'exportation pour les troncs de Peuplier exploités à 4 ans représente un supplément de 230 % pour N, 410 % pour P, 430 % pour K, 470 % pour Ca, 370 % pour Mg par rapport à l'exploitation des troncs de Hêtre en futaie classique. La disproportion entre immobilisation et âge d'exploitation pose très clairement les limites du maintien de la fertilité minérale en très courte révolution.

Tableau VI Pourcentages d'azote et de matière sèche retenus par les différents compartiments d'un jeune peuplement (Peuplier 7 ans) (données de Carter et White, 1971)

Compartiment	Biomasse (en %)	Quantité d'azote (en %)
Tronc bois	69	23
Tronc écorce	11	21
Branches	15	22
Feuilles	5	34
TOTAL	100	100

Tableau VII Exportations liées à l'exploitation du tronc total calculées pour une durée de 140 ans environ (durée de révolution classique pour le Hêtre)

	Tronc total (écorce + bois)					
	N	P	K	Ca	Mg	
Futaie Hêtre CI I - 140 ans ^(*) 8,9 m ³	1 250	150	670	970	164	Kreutzer (1976)
Futaie Epicéa CI I - 2 × 70 ans ^(*) 12,2 m ³	960	84	600	1 140	152	Kreutzer (1976)
Peuplier <i>trichocarpa</i> 12 × 12 ans (6,7 t de MS/ha/an à 12 ans)	1 800	240	1 452	3 228	380	Switzer et al., 1976 in Hansen et Baker (1979)
Peuplier hybride 35 × 4 ans (8,75 t MS/ha/an à 4 ans)	4 165	770	3 535	5 565	770	Witwer et Immel (1978)

(*) Incluant les produits d'éclaircies.

Les conséquences indirectes

Elles résident essentiellement dans une perturbation accrue des stations par suite de l'installation, de l'entretien (mécanique et/ou chimique en phase juvénile) et de la technique de récolte, mais aussi dans une augmentation de la part de la révolution pendant laquelle le terrain n'est pas occupé par un peuplement plein qui protège le sol contre l'érosion et le lessivage.

Il s'agit de modifications apportées à la matière organique et aux **propriétés physiques** des sols.

- *La matière organique*

Rappel du rôle de la matière organique

De très nombreuses études ont montré le rôle fondamental de la matière organique dans la fertilité du sol ; nous le rappelons très sommairement. La matière organique se répartit dans le profil pédologique en horizons holorganiques (litière) et hémiorganiques (A₁, principalement).

La litière joue un rôle (i) physique (protection contre l'érosion, maintien de la constance du pédoclimat), (ii) biochimique (c'est une source de carbone facilement minéralisable utilisée comme source d'énergie par la microflore du sol), (iii) chimique (c'est une source en bioéléments assimilables par les plantes et en particulier d'azote).

Le rôle des matières organiques évoluées des horizons hémiorganiques est plus complexe. On retrouve les rôles chimiques et biochimiques fondamentaux. De plus, dans tous les sols, mais en particulier dans les sols sableux et limoneux, pauvres en colloïdes minéraux, les molécules organiques se comportent, au total, comme de gros anions qui retiennent à leur surface les cations à l'état échangeable, donc disponibles pour la nutrition minérale des végétaux.

Les acides humiques, par leur liaison intime avec la matière minérale, conditionnent la stabilité structurale des agrégats réglant ainsi en partie l'économie en air et eau du sol, paramètres importants dans la croissance des végétaux.

Influence de l'exploitation forestière sur l'évolution de la matière organique

L'évolution de la fertilité organique des sols dépend de la longueur de la révolution. L'exploitation du peuplement final, dans le cas majoritaire des coupes à blanc (mais aussi à chaque prélèvement lors des éclaircies), représente un traumatisme majeur du cycle biologique (cycle des éléments minéraux mais aussi cycle du carbone). En effet, en fonction de l'intensité de la récolte, une partie plus ou moins importante de matière organique accumulée pendant la révolution est exportée ; en particulier, l'exportation des petits compartiments de biomasse prive le sol d'une source de carbone facilement minéralisable, parallèlement à ce qui a été dit pour les éléments minéraux (le carbone équivaut environ à la moitié de la matière sèche utilisée).

Plus la fréquence des extractions augmente, plus la fertilité du sol risque d'être affectée.

Les pertes d'azote liées à l'extraction des feuilles et branches peuvent avoir des effets immédiats sur la croissance des jeunes *Pinus radiata* sur les sols peu fertiles du sud de l'Australie (Squire et Flinn, 1981). L'incinération des rémanents, ainsi que l'andainage, entraînent, tout comme la récolte totale, la perte d'une quantité importante de matière organique pour le sol forestier.

La mise en lumière des humus accumulés pendant la révolution provoque une minéralisation des matières organiques qui libère un flux non négligeable de bioéléments, dont une partie au moins n'est ni retenue par le sol, ni absorbée par la végétation.

Les différentes études (lysimétriques ou bassins versants) montrent que le lessivage est très généralement augmenté après la coupe à blanc. L'amplitude varie avec chaque cas de figure (résultante de l'effet station, peuplement, intensité de la récolte, perturbations liées aux techniques de récolte et de régénération). Le lessivage, très faible dans les peuplements en place non perturbés, s'accroît principalement pour l'azote nitrique et le potassium (Kimmins et Feller, 1976).

Au total, l'effet du raccourcissement des révolutions sur la fertilité organique des sols est complexe, il nécessite de bien prendre en compte les données suivantes :

Un peuplement traité en **révolution moyenne à longue** accumule un humus qui a des effets contradictoires sur la fertilité du sol :

— des effets positifs : la matière organique accumulée constitue une réserve disponible si l'humus se minéralise bien, elle protège le sol contre l'érosion et l'évaporation.

— des effets négatifs : la matière organique constitue une immobilisation d'éléments quand l'humus ne se minéralise pas ; cet humus au pH acide est, de plus, défavorable à l'activité biologique ; il n'y a alors qu'une faible insolubilisation des composés organiques simples susceptibles de produire une dégradation pédologique (Bruckert, 1970). Slack et Suran (1983) ont montré qu'une futaie de Chêne avait plus appauvri le sol en Ca et Mg qu'un taillis-sous-futaie situé dans les mêmes conditions ; dans cet exemple, l'effet d'épuisement du sol par l'exploitation répétée du taillis est moins important que celui d'une accumulation de matière organique acide (moder).

Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt

Dans un peuplement traité à **très courte révolution**, les effets négatifs disparaissent car l'humus inactif n'a pas le temps de se former, d'autant que la majorité des essences utilisées engendrerait plutôt un humus favorable. De plus, les entretiens mécaniques mélangent fortement les litières qui se minéralisent vite. Par contre, les effets positifs tendent également à disparaître et l'on se trouve face à une culture de type agricole, où le taux d'humus tend vers des teneurs très basses.

● Les propriétés physiques

Il est bien connu que la structure du sol détermine sa porosité (capacité en air et eau du sol), facteur très important de la fertilité.

D'une manière générale, les engins d'exploitation et de préparation des stations peuvent créer des perturbations importantes du sol. Les dégâts sont liés au type d'engin, au type de sol, à la saison d'intervention, au pourcentage de surface intéressé par le plan de parcours.

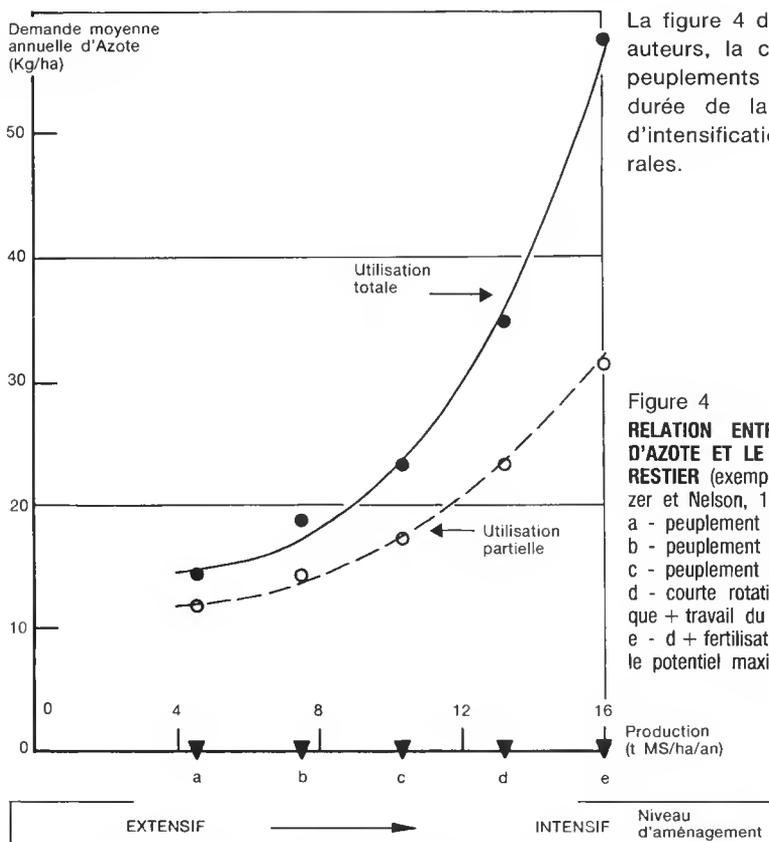
Les dégâts consistent essentiellement en une modification de la structure du sol par compaction et en des phénomènes d'érosion dans les sols en pente (Cromack et al., 1978 ; Rotaru, 1985). Il ne faut pas négliger les impacts des éclaircies.

EFFETS COMBINÉS : ÉTABLISSEMENT DU BILAN ÉQUILIBRE DE LA FERTILITÉ

Switzer et Nelson (1973) donnent un exemple très instructif de l'addition des effets de l'abaissement de l'âge d'exploitation et d'une mobilisation plus complète de la biomasse. Le passage d'une révolution de 40 ans à une révolution de 20 ans entraîne, dans le cas d'une utilisation partielle de la biomasse, un supplément d'exportation de 26 %, 21 %, 16 % et 17 % pour N, P, K et Ca respectivement ; dans le cas d'une utilisation totale, l'augmentation des pertes d'éléments est de 35 %, 35 %, 23 % et 18 %. Une utilisation totale, à la même révolution de 20 ans, exporte 66 % d'azote, 93 % de phosphore, 45 % de potassium et 35 % de calcium de plus qu'une utilisation partielle à 40 ans (tableau VIII).

Tableau VIII **Comparaison des pertes d'éléments dans le cas d'une utilisation partielle et d'utilisation totale pour deux durées de révolution (20 et 40 ans) (*Pinus taeda* ; station riche - Sud-Est des USA en kg/ha)**
(Switzer et Nelson, 1973)

		Une révolution de 40 ans				Deux révolutions de 20 ans				Différences dues à la durée des révolutions			
		N	P	K	Ca	N	P	K	Ca	N	P	K	Ca
Utilisation partielle (tronc total)	Lessivage + érosion	325	16	196	183	418	18	230	260	93	2	34	77
	Coupe	138	12	96	121	166	16	108	96	28	4	12	- 25
	Total (a)	463	28	292	304	584	34	338	356	121	6	46	52
Utilisation totale de la biomasse aérienne	Lessivage + érosion	325	16	196	183	418	18	230	260	93	2	34	77
	Coupe	245	24	149	165	350	36	194	150	105	12	45	- 15
	Total	570	40	345	348	768	54	424	410	198	14	79	62
Différences des pertes totales		107	12	53	44	184	20	86	54				
Différences en % de (a)		(23)	(43)	(18)	(14)	(32)	(59)	(26)	(15)				



La figure 4 donne, d'après les mêmes auteurs, la consommation d'azote de peuplements de *Pinus taeda* suivant la durée de la révolution et le degré d'intensification des méthodes culturales.

Figure 4
RELATION ENTRE LA DEMANDE ANNUELLE D'AZOTE ET LE NIVEAU D'AMÉNAGEMENT FORESTIER (exemple de *Pinus taeda* d'après Switzer et Nelson, 1973)
 a - peuplement naturel de 40 ans,
 b - peuplement naturel de 20 ans,
 c - peuplement naturel de 10 ans,
 d - courte rotation (10 ans) + sélection génétique + travail du sol
 e - d + fertilisation (intensification pour atteindre le potentiel maximum de l'espèce).

L'intérêt de la connaissance de la minéralomasse exportée par les produits forestiers est de permettre un bilan pour savoir si le type de culture pratiquée appauvrit ou non le sol.

L'équation quantitative générale de stabilité de la fertilité du sol est la suivante :

<p>ENTRÉES (apports atmosphériques + altération + fixation d'azote atmosphérique)</p>
<p>= SORTIES (exportations par la récolte principale et les éclaircies + pertes par drainage total pendant la révolution et lors de la coupe + ruissellement éventuel)</p>

Ce bilan ainsi présenté est très global et ne tient pas compte, par exemple, d'éventuels phénomènes de rétrogradation d'éléments assimilables. La difficulté d'établir une telle comparaison a été soulignée dans la première partie de la publication (Ranger et Bonneau, 1984). Le tableau IX récapitule brièvement quelques gammes de valeurs concernant les termes de ce bilan, dans le cas de révolutions de durée classique d'une part, et pour des révolutions courtes d'autre part. Pour les premières, les entrées ont quelques chances de compenser les pertes. Par contre, l'équilibre en P, K, Ca et Mg ne peut se réaliser pour des révolutions de 4 ans que dans des sols disposant de fortes réserves altérables et bénéficiant d'apports extérieurs importants.

Accroissements et dépérissement des peuplements résineux

Pour l'azote, il y a, dans ce type de culture, une certitude de déficit, et après un certain nombre de révolutions, la production baissera.

L'annexe III donne un exemple concret, avec fort départ d'azote et de calcium.

Faute de posséder les éléments nécessaires à l'établissement d'un bilan complet, on peut comparer les exportations prévisibles de minéralomasse au stock d'éléments assimilables du sol, assez facile à évaluer. Par exemple, Johnson et al. (1982) chiffrent à 1 090 kg de calcium par hectare le calcium présent dans le tronc et les branches d'un peuplement mixte de Chêne rouge, d'Hickory et de Tulipier alors que le sol ne contient que 500 kg de cet élément à l'état échangeable et 6 000 kg de calcium total. On peut donc craindre un épuisement assez rapide du sol par le peuplement actuel et une baisse de production à la révolution suivante. Nys et al. (1983) fournissent pour les Ardennes primaires un exemple similaire ; pour deux révolutions d'Épicéa commun, l'exportation de K, Ca, Mg et Mn est de 386, 760, 104 et 250 kg (l'ordre de grandeur est d'ailleurs le même pour les taillis-sous-futaie de 150 ans) alors que les réserves du sol ne sont que de 270, 370, 80, 110 kg/ha respectivement pour ces mêmes éléments. Même si les réserves « mobilisables » sont plus abondantes, ce résultat montre la fragilité de la stabilité d'un tel écosystème soumis à des exportations importantes. En effet, on ne connaît pas la vitesse de mise à disposition pour les plantes des éléments du compartiment « éléments mobilisables » vers le compartiment « éléments échangeables » qui sont utilisables directement par les plantes.

Dans le passé, la récolte de litières en forêt en vue de l'amendement des terres de culture a été pratiquée assez systématiquement dans certaines régions. Ceci a conduit, comme le feraient de modernes méthodes d'exploitation totale, à un appauvrissement considérable de certains sols forestiers, sur des roches mères pauvres, et la forêt est devenue peu productive. C'est un bon exemple de déséquilibre entre entrées et sorties, avec, dans ce cas, transfert de fertilité de terres forestières aux terres agricoles.

D'une manière générale, si le bilan est positif ou nul, le type d'exploitation pratiquée ne pose pas de problème. S'il est positif pour tous les éléments, on peut même envisager de conduire la forêt plus intensivement et d'augmenter la production (changement d'essence) ou l'intensité des récoltes. S'il est négatif, le sol s'appauvrira de révolution en révolution, la production diminuera progressivement jusqu'à ce que soit atteint un équilibre correspondant à des exportations moindres.

Tableau IX

Quelques données générales sur les entrées-sorties en révolution longue ou courte (en kg/ha/an)

	Libération à partir des réserves (in : Clayton, 1979) ^(*)	Apports atmosphériques (in : Bonneau, 1977)	Lessivage hors de la zone racinaire (Cole et Rapp, 1980) ^(*)	Immobilisation moyenne annuelle pour des peuplements traités en révolution longue (Kreutzer, 1976)						Immobilisation moyenne annuelle pour une production de 10 t de MS à 4 ans (in : Hansen et Baker, 1979)		
				(1)	(1')	(2)	(2')	(3)	(3')	(4)	(5)	(6)
N	—	3 - 30	0,5 - 15	19	10	8,5	5,0	11,5	5	58	50	40
P	—	2 - 5	0 - 0,2	2	1	1	0,5	1,5	1	9	18	8
K	tr - 11	2 - 5	1 - 3	11	5	5	3	6	3	23	30	37
Ca	tr - 20	10 - 12	2 - 13	13	6	7	3	9	4	34	—	83
Mg	2 - 15	2 - 5	0,5 - 6	2,2	1,1	1,2	0,6	1,4	0,6	6,5	—	9

tr = traces.

(*) On élimine les sols calcaires.

(1) Pessière classe I - 80 ans

(2) Pineraie classe I - 130 ans

(3) Hétraie classe I - 140 ans

(1') idem classe IV.

(2') idem classe IV.

(3') idem classe IV.

(4) Peuplier hybride.

(5) *Platanus occidentalis*.

(6) *Populus trichocarpa*.

Exportations
ou Bilan naturel

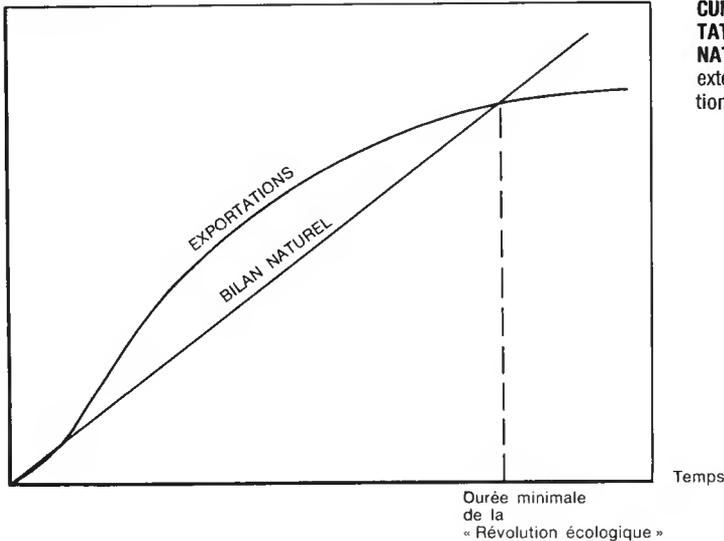


Figure 5

CUMUL AVEC LE TEMPS DES EXPORTATIONS D'ÉLÉMENTS ET DU BILAN NATUREL SUPPOSÉ POSITIF (apports extérieurs + altération - drainage) : notion de « révolution écologique ».

Devant un bilan négatif, l'aménagiste peut avoir deux réactions : compenser le déficit par une fertilisation ou diminuer les exportations en prévoyant un autre type de forêt, moins productif, ou moins exportateur, ou une exploitation moins intensive restituant au sol une plus grande quantité de rémanents. Une autre possibilité est d'allonger la révolution. Ainsi qu'il a été indiqué plus haut, plus la révolution est longue, plus le bois de fort diamètre, moins riche en éléments minéraux que les produits de plus faible dimension, domine dans la biomasse exportée. En outre, la production moyenne diminue au fur et à mesure qu'on allonge les révolutions. La courbe cumulée des éléments immobilisés dans les compartiments qui seront récoltés est donc de plus en plus lentement ascendante (figure 5). Par contre, la somme annuelle des autres termes du bilan (apports, pertes par drainage), supposée positive, est sensiblement constante et la courbe cumulée est approximativement linéaire : au-delà du point où elle coupe celle des exportations, le bilan moyen redeviendrait positif. On peut donc équilibrer ce bilan en choisissant comme âge d'exploitabilité l'abscisse de l'intersection des deux courbes. C'est la notion de « révolution écologique » (Kimmins, 1977).

CONCLUSIONS

L'exportation d'éléments par les récoltes forestières et les pertes consécutives à la dénudation temporaire du sol peuvent varier dans des conditions considérables en fonction du type de culture et d'exploitation. Performances de l'espèce cultivée, intensité de la récolte, durée de la révolution combinent leurs actions propres.

Dans l'idéal, un bilan des pertes et gains en nutriments devrait être établi avant toute décision d'aménagement. Cultiver une essence très performante sur un sol où le bilan serait négatif aurait deux conséquences : on n'atteindrait probablement pas la production escomptée sans enrichir le sol par un apport d'engrais ; l'ayant atteinte, il faudrait maintenir le niveau de fertilité obtenu artificiellement par des apports d'entretien comblant le déficit du bilan.

Ceci peut conduire à de mauvais résultats économiques et il peut être plus judicieux de se contenter d'une essence plus frugale, même si elle est moins productive, d'envisager une révolution plus longue et de n'exploiter que les compartiments les moins minéralisés du peuplement.

Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt

En fonction des considérations qui précèdent, il est clair que les cultures très fortement exportatrices (par exemple les taillis à courte révolution, producteurs intensifs de biomasse, dont on envisage la constitution) devraient être installées de préférence sur les sols riches, c'est-à-dire soumis à de forts apports extérieurs ou possédant une forte réserve de minéraux facilement altérables. Au contraire, ce sont les sols pauvres qui devraient être réservés aux futaies à longue révolution, productrices de bois d'œuvre. Il y a là un certain paradoxe, qui n'est peut-être pas perçu clairement par tous, bien des personnes liant intuitivement taillis et sols pauvres.

Une attitude mixte est possible. Si on dispose d'un sol riche en éléments assimilables et qu'on envisage une culture dont le bilan serait déficitaire, on peut imaginer de consommer une partie de la richesse actuelle (« épargnée » par les peuplements précédents) par une culture fortement exportatrice, puis de lui faire succéder une forêt moins exigeante à plus longue révolution qui, en quelque sorte, reconstituerait l'épargne.

Pour arriver à jouer, avec une telle maîtrise, de la fertilité du sol, il faudrait que les éléments en soient beaucoup mieux connus qu'à l'heure actuelle. Ceci suppose que des progrès très importants soient réalisés dans trois directions. Il faudrait d'abord que soit établie une sorte de cartographie, à très petite échelle, des apports et qu'on sache moduler ceux-ci en fonction des peuplements car les essences à feuillage persistant, par un effet-filtre plus intense, captent davantage de poussières et d'aérosols que les espèces à feuilles caduques. Il serait indispensable, en second lieu, que l'on dispose de moyens de chiffrer la libération d'éléments par altération au moyen de modèles tenant compte de la composition minéralogique du sol et des conditions écologiques (climat, pluviométrie, type d'humus). Il faudrait enfin que l'on établisse progressivement des « tables de minéralomasse » qui seraient le parallèle des tables de production, donnant pour chaque essence et pour chaque classe de production le contenu des différents compartiments, en fonction de l'âge.

Tout ceci représente évidemment un travail extrêmement copieux et de gros moyens analytiques. On peut parier, sans risque, que ce n'est pas avant le XXI^e siècle que les forestiers disposeront de ces outils performants de prévision et de gestion.

J. RANGER - M. BONNEAU
Station de recherches
sur le Sol, la Microbiologie et la Nutrition
des Arbres forestiers
CENTRE DE RECHERCHES FORESTIÈRES (I.N.R.A.)
CHAMPENOUX 54280 SEICHAMPS

Photo O. SÉBART. Photothèque I.N.R.A.



Annexe I Teneur en azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium de différents compartiments de diverses essences
(en % par rapport à la matière sèche)

Essence et âge	Traitement et références	Bois de tronc						Écorce de tronc						Branches vivantes avec écorce						Feuilles					
		N	P	K	Ca	Mg		N	P	K	Ca	Mg		N	P	K	Ca	Mg		N	P	K	Ca	Mg	
Bouleau 30 ans	Taillis clas.	0,08	0,02	0,03	0,07	0,01		0,46	0,04	0,17	0,45	0,03	0,64	0,06	0,22	0,32	0,04	1,24	0,20	1,01	0,54	0,14			
Chêne 30 ans	Taillis clas. (Nys <i>et al.</i> , 1983)	0,15	0,01	0,06	0,11	0,01		0,70	0,03	0,21	0,68	0,06	0,94	0,07	0,27	0,25	0,03	1,53	0,29	1,24	0,38	0,12			
Peuplier 1214 13 ans	Plantation classique (Frison, 1969)	0,08	0,02	0,17				0,65	0,09	0,64			0,42	0,17	0,28			1,79	0,18	1,41					
Pin laricio de Corse 15 ans	Plantation non fertilisée Plantation fertilisée (Ranger, 1981)	0,07	0,003	0,09	0,05	0,014		0,29	0,02	0,26	0,26	0,06	0,39	0,03	0,38	0,35	0,06	1,40	0,07	0,65	0,37	0,11			
Hêtre 80 à 100 ans	Futaie	0,12	0,015	0,09	0,08	0,02		0,75	0,08	0,23	0,9	0,04	0,30	0,05	0,12	0,19	0,02	2,70	0,17	0,85	0,55	0,08			
Pin sylvestre 130 ans	Futaie	0,085	0,005	0,05	0,08	0,02		0,65	0,09	0,35	0,8	0,07	0,65	0,065	0,35	0,20	0,06	1,30	0,13	0,50	0,35	0,10			
Épicéa 130 ans	Futaie (Kreutzer, 1976)	0,08	0,005	0,05	0,09	0,02		0,65	0,08	0,40	0,9	0,07	0,70	0,085	0,30	0,25	0,07	1,25	0,12	0,45	0,40	0,10			
Eucalyptus 7 ans	Jeune futaie (Loumetto, 1983)	0,11	0,035	0,09	0,04	0,02		0,40	0,45	0,52	1,24	0,42	0,34	0,11	0,33	0,28	0,13	2,0	0,23	0,90	0,34	0,29			
Chêne rouge 40 ans	Futaie xx (Johnson <i>et al.</i> , 1982)	0,19	0,01	0,11	1,19								0,21	0,03	0,34	0,83		1,45	0,10	1,07	0,68				

xx : la composition donnée pour le bois est celle du bois avec écorce.

Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt

Annexe II

**Exemple de l'influence de l'âge des arbres
sur leur teneur en bioéléments, ici l'azote (% de matière sèche)**

	Âge	Feuilles	Écorce de branches	Bois de branches	Écorce de tronc	Bois de tronc
Peuplier hybride (Hansen-Baker, 1979)	2	3,0	1,96	0,94	1,76	0,66
	6	3,0	1,62	0,66	1,41	0,34
	8	3,0	1,15	0,49	1,00	0,29
<i>Pinus taeda</i> (Switzer <i>et al.</i> , 1968)	4	1,00	0,41		0,42	0,16
	8	0,95	0,24		0,24	0,06
	18	1,08	0,23		0,23	0,06
	30	1,22	0,22		0,19	0,04
	56	1,16	0,21		0,17	0,03

Annexe III

**Bilan entrées-sorties pour un peuplement de Tremble
à rotation de 30 ans ; sol podzolique sur moraine riche en minéraux
(d'après Boyle *et al.*, 1973)**

Pour le drainage non mentionné par les auteurs, on a repris les chiffres de Wood *et al.* (1977) pour P, K et Ca, et on a estimé le drainage en azote en fonction des autres données

	N	P	K	Ca
Réserve du sol en éléments assimilables sur 20 cm	27	114	129	656
ENTRÉES (Kg/ha/an) :				
Pluie	5,6	0,33	2,5	4,0
Altération	—	1,00	4,0	8,0
Total	5,6	1,33	6,5	12,0
SORTIES (Kg/ha/an) :				
Drainage	6,0	0	2	9
Immobilisation	6,4	0,90	4,3	14,3
Total	12,4	0,90	6,3	23,3
Bilan	- 6,8	+ 0,43	+ 0,2	- 11,3

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON (H.W.), ZSUFFA (L.). - The Yield and wood quality of euramerican poplar grown in two years rotation. - Inter-Poplar Commission, 15 th. Session, Rome, December 1975, 8 pages.
- BALLARD (R.). - Effect of slash and soil removal on the productivity of second radiata pine on a pumice soil. - New Zealand forest service. Forest Research Institute. Soils and Prod. Rep. 86, 1972.
- BONNEAU (M.). - Le cycle biologique en forêt. - Cours de Pédologie forestière. - Nancy : E.N.G.R.E.F., 1977. - 45 pages.
- BOUCHON (J.), NYS (C.), RANGER (J.). - Cubage, biomasse et minéralomasse : comparaison de trois taillis simples des Ardennes primaires. - *Acta oecologica, Oecologia plantarum*, vol. 6 (20), n° 1, 1985, pp. 53-72.
- BOYLE (J.R.), PHILIPS (J.J.), EK (A.R.). - Whole tree harvesting : nutrient budget evaluation. - *Journal of Forestry*, 1973, pp. 760-762.
- BRUCKERT (S.). - Influence des composés organiques sur la pédogénèse en milieu acide. - Thèse université de Nancy I, 1970, 72 pages.

- CARTER (M.C.), WHITE (E.H.). - Dry weight and nutrient accumulation in young stands of Cottonwood (*Populus deltoides* Bartr.). - Auburn V. Ag. Exp. Stat. Circ. 190, 1971, 4 pages.
- CLAYTON (J.L.). - Nutrient supply to soil by rock weathering. - In : Proceedings of USDA symposium « Impact of intensive harvesting on forest nutrient cycling », Syracuse, N.Y., 1979, pp.75-96.
- COLE (D.W.), RAPP (M.). - Elemental cycling in forest ecosystems. - In : Dynamic properties of forest ecosystems, pp. 341-409/D.E.Reich Ed. - Cambridge : University Press, 1981 (International Biological Program, 23).
- CROMACK (C.Jr.), SWANSON (F.J.), GRIER (C.C.). - A comparison of harvesting methods and their impact on soils and environment in the pacific northwest. - In : Forest soil and land use. Proceeding 5th. North American forest soil conference. - Fort Collin : Youngberg Ed., 1978.
- FRISON (G.). - Asportazioni minerali nel poppieto. - *Cellulosa e carta*, n° 6, 1969, pp. 1-8.
- HANSEN (E.A.), BAKER (J.B.). - Biomass and nutrient removal in short rotation intensively cultivated plantations. - In : Proceedings of USDA symposium « Impact of intensive harvesting on forest nutrient cycling », Syracuse, N.Y., 1979, pp. 130-151.
- JOHNSON (D.W.), WEST (D.C.), TODD (D.E.), MANN (L.K.). - Effects of sawlogs v.s. whole tree harvesting on the nitrogen, phosphorus, potassium and calcium budget on an upland mixed oak forest. - *Soil Science Society of America Journal*, vol. 46, n° 6, 1982, pp. 1304-1310.
- KIMMINS (J.P.). - Evaluation of consequences for future tree productivity, of the loss of nutrients in whole tree harvesting. - *Forest Ecology and Management*, 1, 1977, pp. 169-183.
- KIMMINS (J.P.), FELLER (M.C.). - Effect of clearcutting and broadcast slashburning on nutrient budget streamwater chemistry and productivity in Western Canada. - Proceedings Symp. IUFRO Oslo, 1976, pp. 186-197.
- KIMMINS (J.P.), KRUMBLICK (G.S.). - On the question of nutrient losses accompanying whole tree logging. - Proceedings Symp. IUFRO Oslo, 1976, pp. 43-53.
- KRAPFENBAUER (A.), BUCHLEITNER (E.). - Holzernte, Biomassen und Nahorststoffaustrag Nährstoffbilanz eines Fichtenbestandes. - *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, vol. 98, n° 4, 1981, pp. 193-222.
- KREUTZER (M.K.). - Effect of growth on next rotation. - Symposium on the harvesting of a large part of forest biomass., vol. I, tome I, FAO/CEE/OIT/IUFRO, Hyinkaa, Finlande, 14-16 juin 1976.
- LOUMETTO (J.N.). - Répartition des éléments biogènes dans un peuplement d'Eucalyptus de 7 ans. - D.E.A. université de Rennes, Laboratoire d'Écologie végétale, 1983.
- MADGWICK (H.A.I.), JACKSON (D.S.), KNIGHT (P.J.). - Above ground dry matter, energy and nutrient contents of trees in an age series of *Pinus radiata* plantations. - *New Zealand Journal of Forestry Science*, vol. 7, n° 3, 1977, pp. 445-468.
- NYS (C.), RANGER (D.), RANGER (J.). - Étude comparative de deux écosystèmes forestiers, feuillu et résineux, des Ardennes primaires françaises. III. Minéralomasse et cycle biologique. - *Annales des Sciences forestières*, vol. 40, n° 1, 1983, pp. 41-66.
- RANGER (J.). - Étude de la minéralomasse et du cycle biologique dans deux peuplements de Pin laricio de Corse dont l'un a été fertilisé à la plantation. - *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, n° 1, 1981, pp. 127-158.
- 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, 1984, n°2, pp. 93-112.
- ROTARU (C.). - Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. - *Revue forestière française*, vol. XXXVII, n° 5, 1985, pp. 359-370.
- SLACK (M.F.), SURAN (J.C.). - Influence du traitement sylvicole futaie ou taillis-sous-futaie sur la richesse minérale du sol : approche expérimentale. - Nancy : E.N.G.R.E.F., 1983. - 16 pages + annexes.
- SQUIRE (R.O.), FLINN (D.W.). - Site disturbance and nutrient economy of plantation with special reference to *Radiata pine* on stands. - Proceedings Austr. For. Nutr. Workshop, Canberra, ACT, 1981, pp. 291-302.
- SWITZER (G.L.), NELSON (L.E.). - Maintien de la productivité avec des révolutions courtes. - Colloque international sur l'utilisation des engrais en forêt, FAO/IUFRO Paris, 1973, pp. 355-382.
- SWITZER (G.L.), NELSON (L.E.), SMITH (W.H.). - The mineral cycle in forest fertilization theory and practice. - Tennessee Valley Authority Ed., 1968, pp. 1-10.
- TURNER (J.). - Nutrient cycling in an age sequence of Western Washington Douglas-fir stands. - *Ann. Bot.*, n° 48, 1981, pp. 159-169.
- WITWER (R.F.), IMMEL (M.S.). - A comparison of five tree species for intensive fiber production. - *Forest Ecology and Management*, n° 1, 1980, pp. 249-254.
- WOOD (B.W.), WITWER (R.F.), CARPENTER (S.B.). - Nutrient element accumulation and distribution in an intensively cultured american sycamore plantation. - *Plant and Soil*, vol. 48, 1977, pp. 417-433.

EFFETS PRÉVISIBLES DE L'INTENSIFICATION DE LA PRODUCTION ET DES RÉCOLTES SUR LA FERTILITÉ DES SOLS DE FORÊT. II LES EFFETS DE LA SYLVICULTURE (Résumé)

Après avoir défini le fonctionnement de l'écosystème dans un premier article consacré au cycle biologique (Ranger et Bonneau, 1984), nous en donnons une application à la gestion de la fertilité minérale des sols forestiers. L'accent est mis sur la relation entre aménagement et exportation d'éléments nutritifs hors de l'écosystème, qu'il s'agisse du choix des espèces, de la longueur de la révolution ou du taux de récolte de la biomasse produite. Compte tenu des valeurs moyennes des apports (atmosphériques et altération des réserves), il est possible d'établir dans chaque cas de figure un bilan entrées/sorties caractérisant le bilan minéral de la révolution. Sans prendre en compte les évolutions qualitatives qui augmentent en général le terme sorties (modification des MO, des propriétés d'analyses des minéraux etc...), il apparaît nettement que le passage aux révolutions courtes conduisent (pour tous les éléments majeurs) à un bilan déficitaire dans la grande majorité des sols forestiers.

PREDICTABLE EFFECTS OF INTENSIFIED PRODUCTION AND HARVESTING ON THE FERTILITY OF FOREST SOILS. II THE EFFECTS OF SILVICULTURE (Summary)

We defined the functioning of the ecosystem in our first article, devoted to the biological cycle (Ranger et Bonneau, 1984) and we now give an application of it to the management of mineral nutrient fertility in forest soils. Stress is laid on the relation between forest management and the export of nutrient elements out of the ecosystem, whether it relates to the choice of species, the length of the rotation, or the amount of the biomass produced that is harvested. By taking account of the average values of the inputs (atmospheric and weathering of reserves) it is possible to establish for each of the cases in question a balance sheet of inputs and outputs to describe the mineral nutrient balance of the rotation. Even if we overlook the qualitative changes which generally increase the « output » term (changes in the organic matter, in the analytical properties of the minerals, etc...), it seems to be clear that a change-over to short rotations leads to a deficit budget (for all the major elements) in the great majority of forest soils.

ABSEHBARE AUSWIRKUNGEN DER PRODUKTIONS- UND ERNTEINTENSIVIERUNG AUF DIE FRUCHTBARKEIT DER WALDBÖDEN. II DIE AUSWIRKUNGEN DES WALDBAUS (Zusammenfassung)

Nach der Definition des Ökosystems in einem vorausgegangenen Artikel über den biologischen Zyklus (Ranger et Bonneau, 1984), zeigen wir diesmal eine Anwendung auf die Verwaltung der mineralischen Fruchtbarkeit der Waldböden. Der Schwerpunkt liegt auf der Beziehung zwischen Melioration und Ausführung von Nährelementen ausserhalb des Ökosystems; dabei kann es sich um die Artenwahl, die Umtriebszeiten oder um die Ernte der erzeugten Biomasse handeln. Ausgehend von den Mittelwerten der Zufuhr (durch die Atmosphäre oder durch Veränderung der Reserven), ist es möglich für jeden Einzelfall eine Ein- und Ausgangsbilanz, die den Mineralstand der Umtriebszeit charakterisiert, zu erstellen. Ohne die qualitativen Entwicklung miteinzubeziehen, die im allgemeinen den Posten Ausgang erhöhen (Veränderungen der MO, der Eigenschaften der Mineralanalysen, usw.), geht klar hervor, dass der Übergang zu kurzen Umtriebszeiten für alle Hauptelemente zu einer defizitären Bilanz für die meisten Waldböden führt.

EFFECTOS PREVISIBLES DE LA INTENSIFICACION DE LA PRODUCCION Y DE LAS COSECHAS SOBRE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS DEL BOSQUE. II LOS EFECTOS DE SILVICULTURA (Resumen)

Después de haber definido el funcionamiento del ecosistema, en un primer artículo consagrado al ciclo biológico (Ranger et Bonneau, 1984), damos una explicación a la gestión de la fertilidad mineral de los suelos forestales. Acentuamos la relación entre acondicionamiento y exportación de elementos nutritivos fuera del ecosistema, ya se trate de selección de especies, de la longitud del período de la revolución o del coeficiente de cosecha de la biomasa producida. Teniendo en cuenta los valores medios de las aportaciones (atmosféricas y alteración de las reservas), es posible establecer en cada caso de especie, un balance entradas/salidas que caracterizan el balance mineral de la revolución. Sin tomar en cuenta las evoluciones cualitativas, que aumentan en general el término salidas (modificación de los MO, de las propiedades de análisis de los minerales, etc...) aparece netamente que el paso a las revoluciones cortas conducen (para todos los elementos mayores) a un balance deficitario en la gran mayoría de los suelos forestales.