

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

Le cycle biologique en forêt^(*)

J. RANGER - M. BONNEAU

La consommation de bois augmente régulièrement dans les pays industrialisés. Un peu avant la dernière guerre, la forêt de nos pays produisait une proportion importante de gros bois destinés à être employés comme matériau (placages, sciages divers). Depuis, la part de la production ligneuse réservée à du bois-matière à fractionner ou défibrer (panneaux, pâtes) s'est accrue. La perspective plus récente encore d'utiliser de manière croissante le bois comme source d'énergie ajoute encore à la demande prévisible.

Pour satisfaire cette dernière, il vient tout naturellement à l'esprit qu'il faudra à la fois produire plus et utiliser plus complètement la matière ligneuse élaborée par la forêt. Une partie des besoins actuels et futurs pouvant être satisfaite à partir de bois de petites dimensions et même de parties non ligneuses du peuplement, utiliser davantage la production revient à extraire de la forêt des fractions du peuplement qu'on y laissait habituellement comme rémanents : branches, feuilles ou aiguilles, écorces, souches. C'est l'idée de la récolte de l'arbre entier.

Pour produire davantage, on peut, à intensité de culture égale, faire appel à des essences à croissance plus rapide, ou raccourcir la révolution de manière à faire coïncider l'âge d'exploitation avec l'âge d'accroissement moyen maximum en biomasse.

Il est évident que cette augmentation de production et de récolte se traduira par une exportation accrue d'éléments biogènes et notamment de macroéléments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium) qui peut conduire à l'amenuisement plus ou moins rapide du stock d'éléments assimilables du sol et donc mettre en péril sa fertilité et ses capacités de production futures.

Toute réflexion sur cette évolution de la fertilité des sols de forêt nécessite de connaître le fonctionnement de l'écosystème forestier. C'est pourquoi le premier des deux articles consacrés à ce sujet traitera plus spécialement du cycle biologique en forêt.

(*) La deuxième partie de cet article sera publiée ultérieurement.

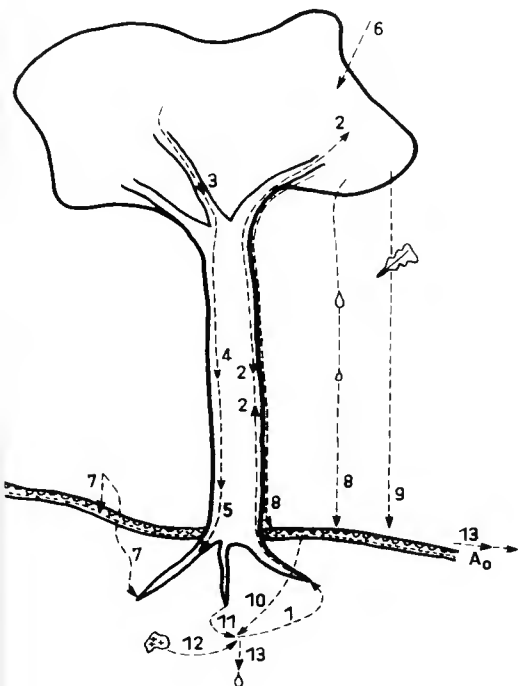
DÉFINITION

On appelle cycle biologique la circulation permanente des éléments minéraux entre les horizons du sol prospectés par les racines, l'arbre (feuilles, branches, tronc, racines), les couches humifères localisées à la surface du sol et enfin, à nouveau le sol.

Ce cycle, ainsi défini de manière succincte, apparaît comme fermé, mais il possède en réalité de nombreuses connexions avec l'extérieur, soit sous forme d'apport d'éléments par l'atmosphère ou l'altération des roches-mères, soit sous forme de pertes. C'est pourquoi on parle souvent de **cycle biogéochimique**. Pour être complet, il faudrait l'étendre à l'écosystème tout entier en faisant intervenir la végétation non arborée dont le rôle peut être considérable.

La figure 1 schématise qualitativement le cycle biologique, en n'y faisant apparaître que les voies principales.

◀ Figure 1 : **REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE QUALITATIVE DU CYCLE BIOLOGIQUE.**



1. **Prélèvement** : absorption des divers éléments par les radicelles dans tout le volume prospecté par les racines.

2. **Stockage provisoire** d'une partie des éléments prélevés dans les organes non perenns de l'arbre (feuilles, graines, fines racines, écorce) après intégration éventuelle de ces éléments dans des molécules carbonées complexes.

3-4-5. **Immobilisation** dans le bois des rameaux, des branches, des troncs, des racines. Le transfert d'éléments des feuilles vers le bois, sous forme de molécules organiques plus ou moins complexes, constitue l'*immobilisation brute*.

Mais réciproquement, au printemps, des éléments stockés en fin de saison de végétation dans le liber ou l'aubier des rameaux et éventuellement du tronc et des racines sont mobilisés pour participer à l'élaboration du nouveau feuillage. On désigne ce phénomène sous le nom de *transfert interne*. L'immobilisation brute, diminuée du transfert interne à partir des organes ligneux, est l'*immobilisation nette*. C'est l'accroissement de la quantité d'éléments contenus dans la masse ligneuse entre deux dates identiques de deux années successives (par exemple entre deux périodes de repos végétatif).

6. **Apports extérieurs par les pluies et les poussières.**

7. **Fixation d'azote atmosphérique** par les microorganismes symbiotiques et ceux de la rhizosphère ou des humus.

8. **Retour au sol par les eaux de pluie** sous forme d'*égouttement* direct des cimes ou d'*écoulement* le long des troncs. L'ensemble des eaux d'écoulement et d'égouttement constituent les *pluiolessivats bruts* qui contiennent, outre les éléments apportés par les pluies ou déposés sous forme de poussières sur les feuilles et les branches, des éléments directement diffusés de l'intérieur des feuilles par voie physicochimique ou par l'action des microorganismes de la phyllosphère et mobilisés par l'eau qui s'écoule à leur surface.

On désigne par **pluiolessivage net** cette extraction à partir des feuilles qui est égale, pour un élément donné, à la quantité contenue dans les pluiolessivats bruts diminuée des apports.

9. **Retour d'éléments au sol** par les feuilles, graines, fruits, petits rameaux, branches mortes. Ces fragments végétaux peuvent s'accumuler à la surface du sol, année après année, pour former les *couches holorganiques*, désignées par A_o et qui, dans leur développement maximum, qui n'est pas toujours atteint, comprennent les trois couches L (*litière*), F (*couche de fragmentation*) et H, de plus en plus transformées (l'ensemble des deux dernières étant souvent noté A_o).

10. **Libération d'éléments** à partir des horizons holorganiques, entraînement et incorporation dans les horizons sous-jacents. Ce transfert a lieu sous forme d'ions en solution (cations métalliques ou ammonium, nitrates, sulfates, etc.) soit sous forme de complexes organiques solubles. Mais il s'effectue aussi par transfert direct, sous l'action de la microfaune, de molécules humiques, de déjections de microarthropodes, de petits résidus végétaux qui contiennent encore des éléments nutritifs, notamment de l'azote, sous forme organique qui ne redeviennent assimilables par les racines qu'après une nouvelle transformation. Pour l'ensemble de ces phénomènes on peut parler, par simplification de langage, de *minéralisation*.

11. **Libération d'éléments à partir des racines mortes ou d'exsudats racinaires.** Les radicelles peuvent être considérées, au même titre que les feuilles, comme des organes non pérennes qui meurent et se régénèrent suivant un rythme saisonnier. Lorsqu'on parle de retour biologique on ne pense souvent qu'à celui des organes aériens (feuilles, rameaux, écorces, branches mortes...) mais on devrait y inclure également les radicelles dont la biomasse est importante.

12. **Rechargement du complexe absorbant en éléments nutritifs** sous forme ionique assimilable à partir des fragments de la roche-mère en cours d'altération, de composés secondaires d'insolubilisation ou de rétrogradation pédologiques (phosphates insolubles, oxydes, éléments rétrogradés entre les feuillettes argileux). L'ensemble de ces phénomènes est appelé **altération**.

Comme certains composés humiques ne sont que très lentement minéralisés et constituent dans le sol un stock d'azote organique souvent fort ancien, qu'on peut comparer dans une certaine mesure aux oxydes ou phosphates secondairement formés, certains auteurs rangent également dans l'altération cette lente minéralisation d'azote. Cet élément venant, à l'origine, de l'atmosphère, et la masse d'humus étant beaucoup plus limitée que celle de la roche-mère altérable, nous n'adopterons pas cette position, qui nous semble incorrecte. Les éléments contenus dans l'humus seront rangés avec les éléments assimilables même s'ils ne le sont, parfois, qu'à beaucoup plus long terme que ceux qui sont liés directement au complexe absorbant.

13. **Pertes** : élimination hors de l'écosystème, à l'état dissous ou complexé, ou sous forme de suspensions de colloïdes ou de particules organiques ou minérales, par les eaux de drainage ou de ruissellement. Il faudrait y ajouter les pertes par le pollen (mal connues), éventuellement les feuilles emportées par le vent ou les eaux de ruissellement.

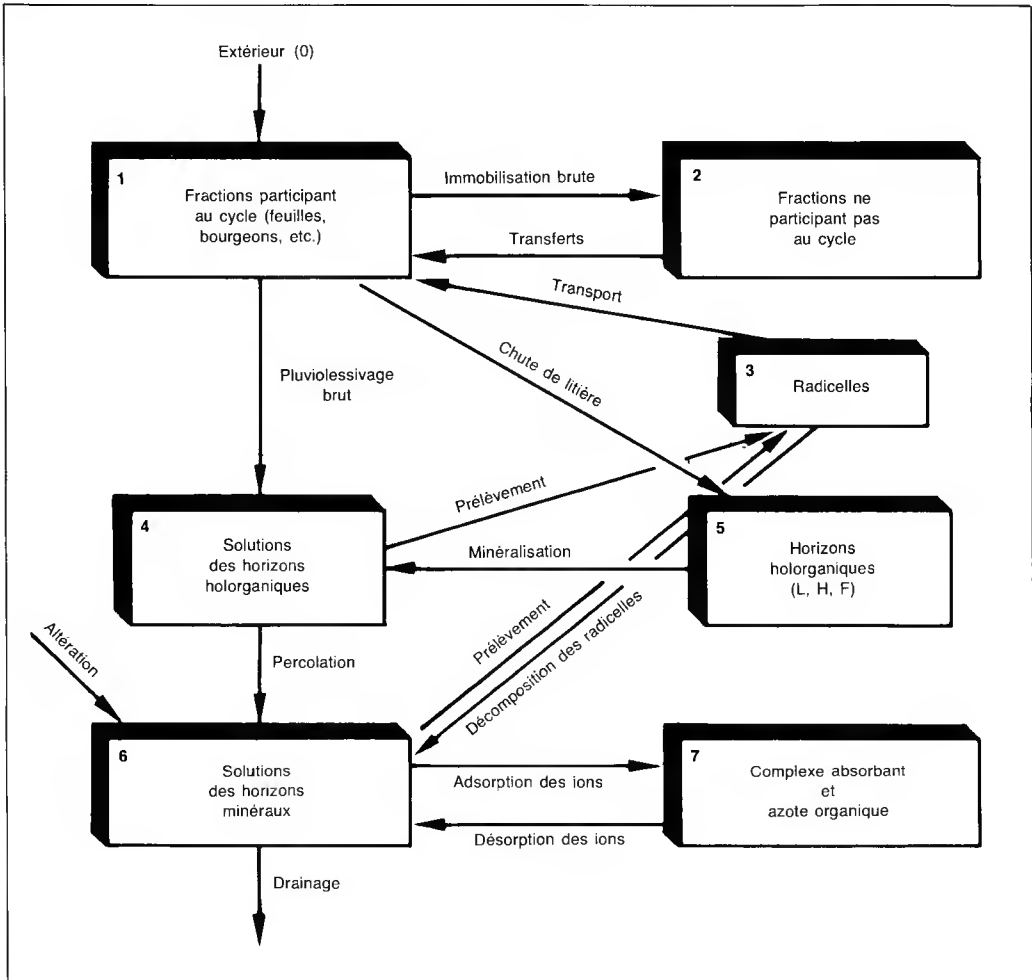
Ce schéma est volontairement limité à ce qui intéresse directement la vie des arbres ; en ont été éliminés par simplification beaucoup de cycles secondaires qui font intervenir la flore compagne d'arbustes ou de plantes herbacées ainsi que la faune et bien entendu l'homme.

ASPECTS QUANTITATIFS DU CYCLE BIOLOGIQUE : COMPARTIMENTS ET FLUX

Principe

La figure 2 donne une représentation plus schématique du cycle biologique qui facilite la présentation des données et des calculs. L'ensemble de l'écosystème est divisé en compartiments ; à chacun d'eux est affectée la masse de chacun des éléments qu'il contient, appelée *miné-*

Figure 2 : REPRÉSENTATION DU CYCLE BIOLOGIQUE PAR COMPARTIMENTS ET FLUX.



ralomasse. Certains compartiments (1, 2, 3) représentent le peuplement, d'autres le sol (4, 5, 6, 7). Noter que la roche-mère, ainsi que les fragments inaltérés de roche-mère contenus dans le sol, sont considérés comme extérieurs à l'écosystème. Seuls le stock d'éléments assimilables, la solution du sol et le stock de matières humiques sont réputés appartenir à l'écosystème.

Ces compartiments échangent entre eux et avec l'extérieur des flux d'éléments qu'on peut désigner par deux chiffres (celui du compartiment de départ et celui du compartiment d'arrivée) et qu'on peut chiffrer en kg d'élément par hectare et par an. L'extérieur de l'écosystème est considéré comme le compartiment 0.

En écrivant que la variation de minéralomasse d'un compartiment, pour un élément, est égale à la somme algébrique des flux qui arrivent à lui et qui en partent, on a un système d'équations dont certains termes sont connus, ou directement accessibles, d'autres inconnus mais déterminables grâce à ce système d'équations et, éventuellement, à certaines hypothèses simplificatrices.

Compartiments et flux directement déterminables

Les apports extérieurs d'éléments par les pluies et les poussières, de même que les chutes de litière, les pluiolessivats, les pertes par drainage peuvent être facilement obtenus par des appareillages simples : pluviomètres, pièges à litière, plaques lysimétriques, permettant de recueillir des échantillons d'eaux, de feuilles, etc., dont l'analyse fournira les flux d'éléments correspondants.

Les compartiments 1 (minéralomasse des organes aériens non pérennes) et 2 (minéralomasse des parties ligneuses) peuvent aussi être déterminés directement, mais au prix d'opérations très contraignantes sur le plan matériel et de calculs délicats. Le principe est de définir dans le peuplement étudié un échantillon d'arbres représentatif des diverses classes de circonférence ; puis d'obtenir pour chacun de ces arbres la quantité d'éléments contenue dans ses différentes parties ou compartiments : feuilles de différents âges, branches de différents diamètres et de position connue dans la cime, écorce des troncs, bois des différents niveaux du tronc, de la souche, des grosses racines : il faut pour cela abattre un certain nombre d'arbres, les fragmenter en « compartiments », peser et analyser ces derniers, établir les relations qui lient les caractéristiques mesurables des compartiments (par exemple diamètre des branches et position dans la cime) à leur minéralomasse ; appliquer ces relations à l'ensemble des arbres-échantillons ; en tirer les équations qui lient la circonférence des arbres à la minéralomasse des compartiments. A partir de ces « tarifs » par compartiment, on pourra passer aux compartiments de l'ensemble du peuplement après inventaire des circonférences de ce dernier sur une surface de quelques ares (Ottorini, 1974 ; Ranger, 1977).

On établira le contenu de ces compartiments pour une année n et pour l'année $n + 5$, ou $n - 5$, si l'on connaît les circonférences à 2 dates (au besoin par carottage des arbres). Ainsi, on peut connaître la variation du compartiment 1 sur 5 ans et, de là, sa variation moyenne annuelle ; de même pour le compartiment 2 dont la variation moyenne ainsi calculée est l'immobilisation nette.

Le compartiment 3 de la figure 2 (radicelles) est beaucoup plus difficilement accessible et l'évaluation de sa minéralomasse sujette à de fortes erreurs. Aussi considère-t-on parfois, par commodité, qu'il est invariable : chaque année un certain nombre de radicelles meurent et il en est élaboré une quantité égale qui reprend au sol les éléments libérés par la décomposition des premières. Ce n'est vrai que pour des peuplements adultes, mais inexact pour des arbres jeunes ou vieillissants.

Le contenu en éléments de l'humus (compartiment 5) peut être calculé assez facilement et de manière relativement exacte par échantillonnage et analyse.

Par contre le compartiment 7 (stock d'éléments assimilables) ne peut être déterminé qu'avec une beaucoup plus forte erreur due à la forte variation, même sur une surface restreinte, des caractéristiques du sol : teneur en éléments fins et notamment en colloïdes, densité apparente, saturation du complexe absorbant. On ne peut obtenir que des ordres de grandeur assez grossiers, trop peu précis en tout cas pour que deux opérations, menées à quelques années d'intervalle, puissent renseigner valablement sur la diminution ou l'augmentation des quantités d'éléments assimilables stockées dans le sol. La profondeur de sol à prendre en considération pour le calcul ne peut également être « décidée » qu'avec une certaine part d'arbitraire, car il n'y a que rarement une limite précise à l'enracinement.

Les compartiments 4 et 6 (solutions du sol) ne font l'objet d'aucune détermination : il est bien évident en effet que les quantités d'éléments contenues dans les solutions du sol sont faibles et peu variables, en moyenne, d'une année à l'autre.

Considérons le compartiment 6 : puisque le flux d'adsorption ou de désorption des éléments assimilables vers, ou à partir, du complexe absorbant ne peut pas être connu directement avec assez d'exactitude, il faudra l'évaluer par calcul.

Ce calcul, basé sur l'invariance de 6, nécessite obligatoirement la connaissance du flux d'altération. Or on ne connaît pas à l'heure actuelle de méthode valable pour le déterminer. L'une des plus employées est de mesurer le flux des éléments transportés annuellement par l'émissaire d'un bassin-versant. Cette quantité n'est cependant pas égale à celle qui est libérée par altération ; elle n'est que la résultante de plusieurs phénomènes : apports extérieurs, immobilisation des peuplements, évolution à long terme de l'humus et du complexe absorbant, qu'il n'est pas facile de chiffrer. Cette méthode n'est acceptable que si le bassin est couvert de peuplements naturels âgés ; on peut alors estimer que des équilibres naturels se sont instaurés entre ces phénomènes et qu'en conséquence les quantités d'éléments stockées dans l'humus et sur le complexe absorbant sont stables.

Il convient aussi de remarquer que l'expression « éléments libérés par altération » n'est pas synonyme d'éléments contenus dans les fragments de roche disparus chaque année, mais seulement la résultante d'un bilan entre dissolution des minéraux primaires et néogenèse de minéraux secondaires, seul ce bilan nous intéressant du point de vue de la nutrition des arbres.

Flux déterminés par calcul

- *Le prélèvement* (flux 43 + flux 63) est une caractéristique fonctionnelle très intéressante de l'écosystème, car c'est par comparaison avec lui qu'on pourra estimer si le stock d'éléments assimilables est suffisant.

En effet les racines des arbres ne prospectent pas tous les sites possibles d'alimentation du sol ; à un instant donné une partie seulement leur est accessible et cette proportion dépend de la mobilité, faible ou forte, de l'élément considéré, c'est-à-dire de la facilité avec laquelle il passe des sites d'adsorption à la solution du sol. Elle dépend aussi de la densité de ramification des racines, de la mycorhization. On peut admettre que ce stock doit être de 40 à 100 fois le prélèvement pour un élément peu mobile comme le phosphore et de 10 à 20 fois pour des éléments moins fortement retenus par le complexe absorbant comme le calcium ou le potassium. Pour l'azote, le prélèvement doit être mis en parallèle, non avec le stock d'azote minéral ou total, qui n'ont de sens ni l'un ni l'autre car le premier varie rapidement et le second ne rend compte que partiellement des capacités de nutrition du sol, mais avec la production annuelle estimée d'azote minéral.

Le prélèvement d'un élément peut être calculé par la formule suivante qui se démontre facilement à partir de la figure 2.

Prélèvement = immobilisation nette + retours nets + variation annuelle de la minéralomasse des feuilles et des radicelles

La variation annuelle de la minéralomasse des feuilles ne doit pas être confondue avec la quantité d'éléments contenus dans les feuilles élaborées dans l'année : c'est la différence des minéralomasses du feuillage présent sur l'arbre aux dates où l'on effectue le bilan.

Si on fait le bilan en hiver, après la chute des feuilles, cette différence est rigoureusement nulle dans les peuplements à feuilles caduques. Pour les essences à feuilles persistantes, elle est en moyenne nulle pour un peuplement adulte, positive pour un peuplement jeune qui accroît progressivement son feuillage, négative pour un peuplement sénile. Il en est de même pour les radicelles.

On peut donc dans certains cas (tous peuplements adultes, tous peuplements à feuilles caduques si on néglige les radicelles) adopter la formule simplifiée suivante :

Prélèvement = immobilisation + retours nets.

Un autre flux important est l'échange net entre le complexe absorbant et la solution du sol (flux 76 – flux 67) : c'est lui qui indique si le stock d'éléments échangeables est stable, en voie d'appauvrissement ou en voie d'enrichissement. Nous avons déjà abordé la question au paragraphe précédent et lui consacrerons la dernière partie de cet article : sa détermination est l'objectif final, à portée pratique, de beaucoup de travaux qui ont été entrepris sur le cycle biologique.

• *Transfert interne.* Un des transferts internes a été figuré sur le schéma 2 : celui qui a lieu des organes pérennes (bois et liber du tronc, des branches, des rameaux) vers les feuillages. Il se produit au moment du développement des feuillages nouveaux, au printemps. Mais, chez les arbres à feuilles persistantes, une partie non négligeable des éléments nécessaires à l'élaboration des feuillages de l'année vient aussi des feuillages anciens. Il y a donc deux sortes de transferts internes vers les feuillages.

Leur calcul est possible, mais difficile et trop long pour être présenté dans le cadre de cet article. Ranger (1981) en a donné une formulation. Leur intérêt est plutôt d'ordre physiologique.

EXEMPLES DE CYCLES BIOLOGIQUES - DONNÉES CHIFFRÉES

Nous donnons, aux tableaux I et II, l'exemple des cycles biologiques de deux peuplements ; une hêtraie âgée : Solling, Allemagne, 120 ans (Ulrich, 1973) ; un jeune peuplement de Pin laricio : Moulière, dans la Vienne (Ranger, 1981).

Tableau I **Minéralomasse et cycle biologique dans une hêtraie acidophile
de 120 ans, sur limon (hauteur moyenne 26,7 m)
à Solling (Allemagne), d'après Ulrich (1973)**

	N	P	K	Ca	Mg
Minéralomasse (kg/ha) :					
Feuilles	90	6	27	12	2
Bois des troncs	240	36	100	160	40
Ecorce des troncs	80	13	24	80	4
Branches et rameaux (y compris écorce)	60	10	24	40	4
Racines et souches	120	20	48	80	8
Total de l'immobilisation ligneuse	500	79	196	360	56
Cycle (kg/ha/an) :					
Apport par les pluies	24	0,5	2	12	1,8
Retours :					
• Pluviolessivage net	1	0,1	24	20	2,3
• Chute de litière	53	4,3	22	15	1,5
• Retour total net	54	4,4	46	35	3,8
Immobilisation annuelle	14	1,5	7	7	1,6
Prélèvement	68	5,9	53	42	5,4
Pertes par drainage	6	0,01	2	14	2,4
Horizons holorganiques	870	55	98	108	37

Tableau II **Minéralomasse et cycle biologique dans un peuplement de Pin Laricio de Corse, de 18 ans, sur limon à pseudogley (hauteur moyenne 6,45 m)**
Forêt de Moulière (Vienne, France), d'après Ranger (1981)

	Matière sèche	N	P	K	Ca	Mg
Biomasse et minéralomasse (kg/ha) :						
Aiguilles de 1 an	4 528	63	3,4	31	14	5,2
Aiguilles plus âgées	3 474	50	2,1	21	15	3,2
Bois des troncs et souches	43 438	30	1,3	41	22	6,1
Ecorce des troncs	9 697	28	2,0	25	25	5,7
Branches et rameaux (y compris écorce)	12 505	30	2,5	28	36	6,8
Racines	4 154	9	0,4	5	4	1,4
Total de l'immobilisation ligneuse	69 794	97	6,2	99	87	20,0
Cycle (kg/ha/an) :						
Apport par les pluies		7,5	0	1	3,5	1
Retours :						
• Pluviolessivage net		10,9	0,1	8	3,8	1,5
• Chute de litière	2 640	20,8	0,6	3,4	13,9	2,6
• Retour total		31,7	0,7	11,4	17,7	4,1
Immobilisation nette annuelle	6 576	8,6	0,6	8,8	7,5	1,8
Variation de la masse foliaire	788	11,0	0,5	5,2	3,0	0,8
Prélèvement		51,3	1,8	25,4	28,2	6,7
Transferts :						
— entre aiguilles âgées et aiguilles de 1 an		17,5	2,2	14,3	0	0
— entre bois et aiguilles de 1 an		10,4	1,0	8,1	n.d.	n.d.
— transferts totaux		27,9	3,2	22,4	n.d.	n.d.
Pertes par drainage		n.d.	0,1	4,0	n.d.	n.d.
Horizons holorganiques		200	12,7	27	47	17

n.d. : non déterminé.

Plusieurs faits, qu'on retrouve dans chacun de ces cycles, sont dignes d'attention.

L'immobilisation est faible

Quelques kilogrammes d'éléments par hectare et par an, l'azote étant celui qui est le plus abondamment fixé dans les parties ligneuses. En seconde position, viennent le potassium et le calcium, puis le magnésium et enfin le phosphore.

Il est intéressant de comparer cette immobilisation avec les réserves d'éléments assimilables du sol : le tableau III donne, pour diverses profondeurs et divers niveaux de fertilité, les stocks d'éléments assimilables.

En comparant les stocks d'un sol assez fertile (tableau III, colonne de droite) avec l'immobilisation moyenne d'une pessière de classe I ou d'une hêtraie de classe I (tableau IV), on voit que le stock ne correspond qu'aux immobilisations de 200 à 250 ans de phosphore, 60 à 115 ans de potassium, 140 à 200 ans de calcium. Si on suppose que le sol contient 3 000 kg d'azote (stock d'importance moyenne), les immobilisations ne sont couvertes que pour 150 à 230 ans. Ces durées ne correspondent qu'à une ou deux révolutions de tutaie.

Ni la faiblesse des chiffres absolus, ni leur valeur relative minime par rapport aux exportations des cultures agricoles (70 à 80 kg de K, 35 kg de P, 120 à 300 kg de N) ne doivent donc faire illusion : il faut les situer dans le contexte de fertilité des sols forestiers, qui sont souvent très pauvres.

Tableau III

**Quantité d'éléments assimilables (en kg) contenus sur 1 hectare
dans des sols, de diverses profondeurs et fertilités,
supposés sans cailloux**

*Remarque : la richesse du sol est donnée en p. mille de P_2O_5 suivant l'usage agronomique
mais le stock est donné en kg de P, unité adoptée pour les calculs de cycles*

Profondeur du sol	P			K		
	0,02 p. mille de P_2O_5	0,05 p. mille de P_2O_5	0,10 p. mille de P_2O_5	0,1 m.e. pour 100 g	0,15 m.e. pour 100 g	0,2 m.e. pour 100 g
40 cm	45	113	226	197	297	394
70 cm	79	198	396	346	519	692
100 cm	113	282	565	494	741	988

Profondeur du sol	Ca			Mg		
	0,2 m.e. pour 100 g	0,5 m.e. pour 100 g	1 m.e. pour 100 g	0,1 m.e. pour 100 g	0,2 m.e. pour 100 g	0,4 m.e. pour 100 g
40 cm	208	520	104	62	124	248
70 cm	364	910	1 820	109	218	436
100 cm	520	1 300	2 600	156	312	624

Les apports extérieurs et l'altération sont essentiels dans le maintien de la fertilité

Bien que faibles, ils atteignent des valeurs très significatives par rapport à l'immobilisation.

• *L'altération.* Dans les pages précédentes ont été exposées les difficultés auxquelles se heurte son estimation.

Cependant quelques auteurs se sont risqués à des évaluations ; les chiffres qu'ils fournissent se situent dans les fourchettes suivantes (Boyle et al., 1973 ; Wood et al., 1977 ; Clayton, 1979) :

0,5 à 6 kg/ha/an de phosphore	2 à 20 kg/ha/an de calcium
3 à 28 kg/ha/an de potassium	1 à 10 kg/ha/an de magnésium.

Ces plages très étendues de valeurs s'expliquent facilement par le fait que l'altération dépend beaucoup de la roche-mère sur laquelle s'est développé le sol. Elle est faible sur des grès, des granites leucocrates et plus encore sur certains diluviums limoneux qui ont subi une très longue histoire et ne sont donc déjà que le résidu remanié de sols très anciens. Au contraire les granites calco-alcalins, les basaltes, les roches sédimentaires riches en minéraux phylliteux peuvent recharger très activement le complexe absorbant en éléments nutritifs. L'âge du sol, son degré d'évolution, le climat, le type d'humus interviennent également.

En ce qui concerne l'azote, absent de la roche-mère, il ne peut y avoir aucune libération par altération. Seuls les apports extérieurs peuvent entretenir le stock et si, dans certains sols, celui-ci est élevé, c'est parce que les apports de plusieurs siècles ou millénaires passés ont été économisés par une exploitation très faible.

- *Les apports.* L'élément que le milieu extérieur fournit en plus grande abondance est précisément l'azote qui provient soit d'apports directs par les pluies et les poussières, soit de la fixation d'azote atmosphérique par la microflore du sol.

Les apports directs sont au minimum de 3 kg/ha/an sur les côtes ou dans les régions rurales où n'arrivent que des pluies non ou peu polluées et où la seule source d'azote est donc la production de nitrates et d'ammoniaque dans la haute atmosphère (Miller, 1963 ; Bringmark, 1977 ; Ranger, 1971). Ils sont en moyenne dans nos contrées de 10 à 15 kg (Lossaint et Rapp, 1969 ; Rapp, 1971 ; Duvignaud et al., 1969 ; Lemée, 1974 ; Carlisle et al., 1967) et peuvent atteindre 25 kg dans les régions industrielles (Aussenac et al., 1972 ; Ulrich, 1973 ; Nys et Ranger, 1982).

La fixation microbienne d'azote atmosphérique peut intervenir par voie symbiotique ou non symbiotique. Dans le premier cas elle se fait grâce aux *Rhizobium* dans les nodosités des légumineuses, aux actinomycètes (*Frankia*) dans les nodules des aulnes, ou à divers autres microorganismes dans un assez grand nombre d'espèces végétales (*Myrica*, *Hippophae*, *Casuarina*, *Eleagnus*, etc.). Le phénomène, très important en forêt tropicale, est plus limité en forêt tempérée. La fixation symbiotique est d'une trentaine de kg/ha/an pour un peuplement d'aulnes ou une culture intercalaire de lupin ; elle atteindrait 300 kg pour un peuplement de robiniers (Bordmann et De Bell, 1981 ; Rehfuss, 1965 ; Hoffmann, 1961). Rappelons que le boisement des dunes de Gascogne a été réussi grâce à l'introduction du genêt à balais qui fournissait de l'azote aux Pins.

La fixation non symbiotique qui peut être le fait d'organismes aérobies (*Azotobacter*) ou anaérobies (*Clostridium*, algues bleues) est beaucoup moins active. Dans la hêtraie acidophile de Mirwart, Remacle (1977) estime que la fixation peut atteindre 12 kg/ha/an, à la fois dans la rhizosphère, la litière et sur les feuilles vivantes elles-mêmes ; Lemée (1973) l'estime à une dizaine de kg dans les hêtraies de Fontainebleau.

Les autres éléments sont apportés, par les pluies et les poussières, en moindres quantités : 4 à 20 kg de Ca, 4 à 12 kg de K, 1 à 5 kg de Mg, 0,1 à 0,5 kg de P.

En comparant ces différents chiffres à ceux de l'immobilisation (tableaux II, III et IV), on doit donc conclure que les éléments empruntés par les écosystèmes forestiers au cycle général, grâce aux poussières, aux précipitations, à l'activité microbienne, revêtent une importance très significative dans le maintien de leur fertilité, de même que la recharge du complexe absorbant assurée par l'altération des minéraux.

Les prélèvements sont beaucoup plus importants que l'immobilisation mais sont couverts en grande partie par les retours

Pour l'azote la proportion atteint 80 % dans la hêtraie de Solling. A Moulière, elle est seulement de 61 % car il s'agit d'un peuplement jeune dont la masse foliaire s'accroît encore d'année en année. Les proportions sont sensiblement les mêmes pour le potassium, le calcium et le magnésium, moindres pour le phosphore.

Le retour par les feuilles est généralement supérieur à celui assuré par le pluviollessivage en ce qui concerne l'azote, le phosphore, le calcium et le magnésium. Pour le potassium au contraire, le lessivage des cimes est souvent fortement prépondérant car cet élément est presque entièrement à l'état soluble dans les feuilles.

Ainsi le cycle des éléments nutritifs apparaît comme particulièrement actif en forêt. Du fait du retour intégral des litières au sol le prélèvement annuel ne représente qu'un emprunt momentané au stock des éléments assimilables : à la fin de la saison de végétation, ou même en cours de saison grâce au pluviollessivage des cimes, la moitié ou les trois quarts des éléments prélevés lui reviennent, ou du moins reviennent à la surface du sol. Les litières doivent en effet subir la minéralisation pour que ce retour soit effectif.

Diverses sources, notamment Kreutzer (1976) et Ulrich (1973) permettent de donner pour quelques essences et diverses classes de production des ordres de grandeurs annuels moyens, pour l'ensemble de la révolution, du prélèvement, du retour et de l'immobilisation annuels (tableau IV).

Les pertes par drainage

Elles sont importantes surtout pour l'azote (3 à 10 kg/ha/an), généralement modérées pour le potassium (1 à 4 kg/ha/an), toujours très faibles pour le phosphore (moins de 1 kg/ha/an), très variables pour le calcium et le magnésium du fait des phénomènes de décarbonatation intervenant dans les sols calcaires ou calcimagnésiques. En sol acide elles sont de 1 à 10 kg de Ca et de 1 à 2 kg de Mg/ha/an.

Les transferts internes sont d'une importance primordiale

A Moulière par exemple, c'est de ces transferts à partir des aiguilles anciennes et du bois que proviennent 44 % de l'azote, 94 % du phosphore, 74 % du potassium nécessaires à l'élaboration des nouvelles aiguilles et du cerne annuel. Ces chiffres élevés s'expliquent par le fait qu'il s'agit d'un peuplement jeune dont la masse foliaire est en forte croissance.

D'après d'autres auteurs, ils sont moins élevés : 20 % pour l'azote dans des peuplements feuillus d'après Henderson et Harris (1975), 50 % pour *Pinus elliottii* d'après Switzer et al. (1968), mais ces auteurs n'ont pas tenu compte des transferts à partir du bois.

Ainsi, au cycle « externe » du prélèvement et des retours par les litières et les pluviocessivats s'ajoute un cycle interne très actif qui témoigne de la complexité de fonctionnement des écosystèmes forestiers et qui explique certainement que l'apport par fertilisation de certains éléments, apportés en quantités relativement faibles et qui pourraient être sujets à des pertes importantes par drainage, le potassium par exemple, exercent un effet très durable (Malvos, 1981 ; Ohta et al., 1983).

ÉVOLUTION DU STOCK D'ÉLÉMENTS ASSIMILABLES DU SOL AU COURS DE LA RÉVOLUTION

Soumis d'une part à des gains (apports, retours de litières et d'eaux de pluviocessivage, altération), d'autre part à des pertes (drainage, prélèvement), le stock d'éléments assimilables du sol est donc susceptible d'augmenter ou de diminuer.

La figure 3 simplifiée permet, dans le cas général, de calculer cette variation ΔS .

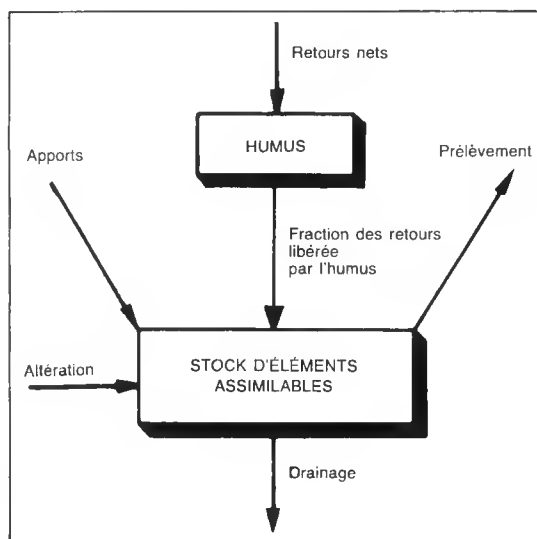


Figure 3 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES FLUX INTERVENANT DANS LA VARIATION DU STOCK D'ÉLÉMENTS ASSIMILABLES.

ΔS = fraction des retours libérée par l'humus + altération + apports extérieurs – prélèvement – drainage.

Mais on peut écrire :

Prélèvement = immobilisation + retours nets + variation de la minéralomasse des feuillages (Δf) et des radicelles (Δr).

Fraction des retours libérée par l'humus = retours nets – variation des éléments contenus dans l'humus (ΔH).

D'où : ΔS = apports extérieurs + altération – drainage – immobilisation – $\Delta(f + r)$ – ΔH .

Quelques remarques s'imposent :

— Aux pertes par drainage, il faudrait ajouter toutes les pertes annexes si on les suppose importantes (pollens, pertes de particules solides, feuilles, etc., dans les eaux de ruissellement).

— Bien que les feuillages persistants et les radicelles ne soient pas composés d'organes perennes, leur élaboration progressive, tant que le peuplement est vivant, correspond à une perte permanente pour le stock d'éléments échangeables. On parle quelquefois, pour l'ensemble des feuillages, des radicelles et de l'immobilisation ligneuse, d'*incorporation*.

— Les apports externes passent, en grande partie, par les horizons humifères. Il n'est pas exclu qu'une partie de ces apports puisse être immobilisée par des microorganismes et inclus dans des molécules humiques à turn-over lent. Le schéma n° 3 est donc inexact et nous le présentons ainsi par souci de simplification. L'équation résultante reste exacte car si des apports restent bloqués dans l'humus la variation ΔH prend en compte ce phénomène.

— Par variation de l'humus il faut entendre celle des couches holorganiques (L, F, H) à l'exclusion de la matière humifiée *sensu stricto*, mélangée au sol minéral, et dont on peut considérer que les éléments qu'elle contient ont fait retour au stock assimilable.

On peut s'intéresser à la variation du stock d'éléments échangeables soit pour l'ensemble de la révolution, soit pour certaines phases de celle-ci.

Pour l'ensemble de la révolution

Rappelons d'abord le but du bilan : il est de vérifier si, en fin de révolution, le stock d'éléments assimilables s'est maintenu, ou a diminué, et si cette diminution est suffisamment forte pour que le prélèvement du peuplement s'en trouve limité.

Si on admet qu'au début de la révolution il n'y a généralement pas de couche A₀ (elle a été minéralisée à l'occasion de la coupe de régénération), et comme il n'y a encore ni feuilles ni radicelles, les valeurs de $\Delta(H)$, $\Delta(f)$ et $\Delta(r)$ se résument aux quantités d'éléments accumulés en fin de révolution dans les horizons holorganiques, les feuillages et les fines racines.

Prenons à nouveau l'exemple des deux peuplements dont le cycle a été présenté aux tableaux II et III.

• *Solling* (tableau II). L'âge du peuplement est de 120 ans. Supposons que les pertes par drainage et les apports n'aient pas varié au cours de la révolution et fixons l'altération, sur ce limon ancien à :

N	: 0	kg/ha/an	K	: 3	kg/ha/an	Mg	: 1,5	kg/ha/an
P	: 0,5	kg/ha/an	Ca	: 5	kg/ha/an			

$\Delta f = 0$ puisque, s'agissant d'un peuplement à feuilles caduques, il n'y a pas de feuillages accumulés en fin de révolution. Estimons la minéralomasse des radicelles à 3 kg d'azote, 0,2 kg de phosphore, 0,9 kg de potassium, 0,4 kg de calcium, 0,1 kg de magnésium et majorons l'immobilisation ligneuse de 25 % pour tenir compte du bois retiré en éclaircie.

Tableau IV

Prélèvement, immobilisation et retours annuels
(moyens pour l'ensemble de la révolution) en kg/ha/an.
 En partie d'après Ulrich (1973) et Kreutzer (1976)

		N	P	K	Ca	Mg
PESSIÈRE Classe I	P	68	6,4	39	37	4,2
	I	20	2,0	11	13	2,2
	R	48	4,4	28	24	2,0
PESSIÈRE Classe III	P	42	4,7	27	23	3,0
	I	12	1,4	7	8	1,8
	R	30	3,3	20	15	1,2
PESSIÈRE Classe IV	P	34	3,3	19	19	1,8
	I	10	1,1	5	7	1,2
	R	24	2,2	14	12	0,6
PINERAIE Classe I	P	26	2,5	28	27	2,3
	I	9	1,0	6	7	1,3
	R	17	1,5	22	20	1,0
PINERAIE Classe IV	P	14	1,3	16	15	1,2
	I	5	0,5	3	4	0,7
	R	9	0,8	13	11	0,5
HÊTRAIE Classe I	P	81	6,8	42	33	4,3
	I	13	1,6	6	9	1,5
	R	68	5,2	36	24	2,8
HÊTRAIE Classe III	P	51	4,6	27	21	2,7
	I	9	1,4	4,5	6	0,9
	R	42	3,2	22,5	15	1,8
HÊTRAIE Classe IV	P	31	2,9	16	15	2,2
	I	5	0,7	3	4	0,7
	R	26	2,2	13	11	1,5

Les variations du stock d'éléments seraient alors en fin de révolution.

Azote total

$$\Delta S = (24 \times 120) + 0 - (6 \times 120) - 625 - 3 - 870 = + 662 \text{ kg/ha}$$

Phosphore assimilable

$$\Delta S = (0,5 \times 120) + (0,5 \times 120) - (0,01 \times 120) - 99 - 0,2 - 55 = - 35,4 \text{ kg/ha}$$

Potassium échangeable

$$\Delta S = (2 \times 120) + (3 \times 120) - (2 \times 120) - 245 - 0,9 - 98 = + 16,1 \text{ kg/ha}$$

Calcium échangeable

$$\Delta S = (12 \times 120) + (5 \times 120) - (14 \times 120) - 450 - 0,4 - 108 = - 198,4 \text{ kg/ha}$$

Magnésium échangeable

$$\Delta S = (1,8 \times 120) + (1,5 \times 120) - (2,4 \times 120) - 70 - 0,1 - 37 = - 48 \text{ kg/ha}$$

Un tel écosystème forestier fonctionne donc sans qu'on ait à craindre un appauvrissement ni en azote (grâce à des apports importants) ni en potassium. En fin de révolution le sol se trouve notablement déprimé en phosphore, en calcium et en magnésium. B. Ulrich (1973) indique que le stock de phosphore assimilable est de 460 kg/ha. Si on estime que le prélèvement s'opère

sans restriction pour un stock de 250 kg/ha on voit que le déficit de 35 kg en fin de révolution ne peut pas être gênant. Pour le calcium, par contre, le stock assimilable n'est que de 250 kg/ha ; le déficit est donc presque égal à la réserve qui déjà est au strict minimum. Il y a donc un indéniable problème pour cet élément, ainsi que pour le magnésium.

• *Moulière*. Le peuplement étudié par J. Ranger est encore jeune et nous ne pouvons donc aborder un bilan qu'en nous livrant à un certain nombre d'extrapolations. Nous pouvons estimer par exemple :

— que la minéralomasse des feuillages et de l'humus seront, en fin de révolution, 1,5 fois plus fortes qu'à 18 ans ;

— que la minéralomasse des racelles sera 1/30 de celle des feuillages ;

— que l'altération est faible (limon très acide et très ancien) ;

P : 0,5 kg/ha/an Ca : 3 kg/ha/an
K : 4 kg/ha/an Mg : 4 kg/ha/an

— que l'immobilisation ligneuse à 80 ans, en fin de révolution, sera de l'ordre de 4 fois sa valeur à 18 ans pour le bois et l'écorce des troncs (donc à peu près proportionnelle à l'âge, éclaircies comprises), et 2 fois seulement pour les branches, les rameaux et les racines.

Dans ces conditions on aura, en fin de révolution :

Δf	: N : 113 $\times$ 1,5 = 165 kg/ha	Ca : 29 $\times$ 1,5 = 43,5 kg/ha
	P : 5,5 $\times$ 1,5 = 8,25 kg/ha	Mg : 8,4 $\times$ 1,5 = 12,6 kg/ha
	K : 52 $\times$ 1,5 = 78 kg/ha	
Immobilisation :	N : (58 $\times$ 4) + (39 $\times$ 2) = 310 kg/ha	Ca : (47 $\times$ 4) + (40 $\times$ 2) = 268 kg/ha
	P : (3,3 $\times$ 4) + (2,9 $\times$ 2) = 19 kg/ha	Mg : (11,8 $\times$ 4) + (8,2 $\times$ 2) = 63,6 kg/ha
	K : (66 $\times$ 4) + (33 $\times$ 2) = 330 kg/ha	
Δr	: N : 5,6 kg/ha	ΔH : N : 200 $\times$ 1,5 = 300
	P : 0,30 kg/ha	P : 12,7 $\times$ 1,5 = 19
	K : 2,60 kg/ha	K : 27 $\times$ 1,5 = 40,5
	Ca : 1,50 kg/ha	Ca : 47 $\times$ 1,5 = 70,5
	Mg : 0,50 kg/ha	Mg : 17 $\times$ 1,5 = 25,5
Drainage	: N : 6 kg/ha/an (estimation)	Ca : 5 kg/ha/an (estimation)
	P : 0,1 kg/ha/an	Mg : 2 kg/ha/an
	K : 4 kg/ha/an	

Les variations calculées du stock seraient en fin de révolution :

Azote

$$\Delta S = (7,5 \times 80) + 0 - (6 \times 80) - 310 - (165 + 5,6) - 300 = - 660,6$$

Phosphore

$$\Delta S = 0 + (0,5 \times 80) - (0,1 \times 80) - 19 - (8,25 + 0,30) - 19 = - 14,5$$

Potassium

$$\Delta S = (1 \times 80) + (4 \times 80) - (4 \times 80) - 330 - (78 + 2,6) - 40,5 = - 371,1$$

Calcium

$$\Delta S = (3,5 \times 180) + (3 \times 80) - (5 \times 80) - 268 - (43,5 + 1,50) - 70,5 = - 263,4$$

Magnésium

$$\Delta S = (1 \times 80) + (4 \times 80) - (2 \times 80) - 63,6 - (12,6 + 0,50) - 25,5 = 137,8$$

On aurait dans cette station, en raison des faibles apports et d'une faible altération, et malgré une faible productivité (due à une carence en P) un bilan en fin de révolution nettement négatif pour tous les éléments sauf le magnésium. Compte tenu des stocks d'éléments assimilables, 113 kg

de P (déjà très insuffisant), 761 kg de K (moyen), 1 772 kg de Ca (assez bon), ces déficits limiteraient la production en fin de révolution, surtout pour P et K. Le déficit d'azote, important puisque le stock organique total n'est que de 2 850 kg/ha, serait également de nature à limiter la production N minéral, et même dans une proportion supérieure au déficit du capital. La libération d'azote minéral n'étant actuellement que de l'ordre de 30 kg/ha/an, on aurait très probablement une offre d'azote insuffisante.

Pour diverses périodes de la révolution

Dans la vie d'un peuplement on peut distinguer quatre phases :

- *une phase d'installation* pendant laquelle le peuplement commence à s'installer, produit relativement peu de matière ligneuse, mais élabore des feuillages et des racines, profite de la minéralisation des rémanents et de l'humus hérités du peuplement précédent et perd par drainage, du fait de cette minéralisation, des quantités d'éléments un peu plus importantes que la moyenne. Cette phase s'étend de 0 à 8-10 ans, de la création du peuplement à la fermeture du couvert ;
- *une phase de jeunesse*, après la fermeture du couvert. L'élaboration de feuillages, de rameaux et de racines se ralentit, le drainage diminue un peu, mais l'immobilisation ligneuse dans le tronc et les branches est plus élevée. Le bilan des éléments du complexe absorbant est fortement négatif pour ces deux premières périodes ;
- *une période de maturité*. Les feuillages et les radicelles ne s'accroissent plus et même diminuent légèrement, mais les quantités d'éléments stockés dans l'humus augmentent encore. Le drainage reste modéré, l'immobilisation reste active, mais globalement le bilan a tendance à se rapprocher de l'équilibre ;
- *une phase de vieillesse*. Le stockage dans les litières ne progresse plus, l'immobilisation ligneuse se ralentit, le drainage peut augmenter légèrement. Le bilan s'équilibre ou devient même positif.



Exploitation à blanc d'un taillis de châtaignier à Melle (Deux-Sèvres).

Photo J. RANGER.

Tableau V

**Simulation de l'évolution annuelle et totale
pour une pessière de classe IV (révolution de 100 ans),
du stock de calcium et de potassium échangeable du sol**

	Bilan annuel (kg/ha/an)				Bilan total kg/ha
	Installation 0-10 ans kg/an	Jeunesse 10-30 ans an	Maturité 30-70 ans	Vieillesse 70-100 ans	
Calcium :					
+ Apports	+ 12	+ 12	+ 12	+ 12	+ 1 200
+ Altération	+ 5	+ 5	+ 5	+ 5	+ 500
- Drainage	- 12	- 10	- 10	- 12	- 1 080
- Immobilisation	- 3,7	- 7,8	- 10,2	- 6,1	- 784
- Variation des feuilles et radicelles .	- 5,3	- 3,2	+ 0,2	- 0,2	- 115
- Stockage dans les litières et horizons holorganiques	+ 1	- 1,2	- 1,5	0	- 74
Bilan annuel	- 3	- 5,2	- 4,5	- 1,3	- 353
Potassium :					
+ Apports	+ 2	+ 2	+ 2	+ 2	+ 200
+ Altération	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3	+ 300
- Drainage	- 1,7	- 1,5	- 1,5	- 1,7	- 158
- Immobilisation	- 3,7	- 3,9	- 2,3	- 0,6	- 225
- Variation des feuilles et radicelles .	- 5,7	- 2,5	+ 0,5	0	- 87
- Stockage dans les libérés et horizons holorganiques	+ 1	- 1,2	- 1,5	0	- 74
Bilan annuel	- 5,1	- 4,1	+ 0,2	+ 2,7	- 44

Dans le tableau V, nous donnons une idée de cette évolution du stock du calcium et du potassium pour un peuplement forestier théorique : une pessière de classe IV dont les immobilisations et les feuillages évolueraient comme l'indiquent Krapfenbauer et Buchleitner (1981), et dont l'altération, les apports et les drainages sont approximativement calqués sur ceux de Solling, mais ajustés en fonction de la révolution (100 ans). Plus précisément l'immobilisation ligneuse tient compte de la totalité du peuplement principal (tronc, écorce, branches, rameaux) et on y ajoute les éléments enlevés par les éclaircies dont on suppose qu'elles exportent uniquement les troncs avec écorce. La figure 4 reproduit d'ailleurs l'évolution des minéralomasses incorporées dans le peuplement sur pied et les éclaircies à différents âges. On voit, d'après le tableau V, que les deux éléments calcium et potassium se comportent de manière sensiblement différente, les stocks du premier diminuant jusqu'en fin de révolution, tandis que ceux du second commencent à se reconstituer un peu avant 70 ans.

CONCLUSIONS DE LA PREMIÈRE PARTIE

Le complexe absorbant du sol et sa garniture d'ions échangeables constituent le stock dans lequel puise le peuplement forestier pour assurer sa croissance et sa production. Par le jeu du retour des feuilles ou aiguilles et des pluviollessivages nets, la majeure partie des prélèvements annuels est restituée chaque année au sol et, si la minéralisation des litières est rapide, au complexe absorbant.

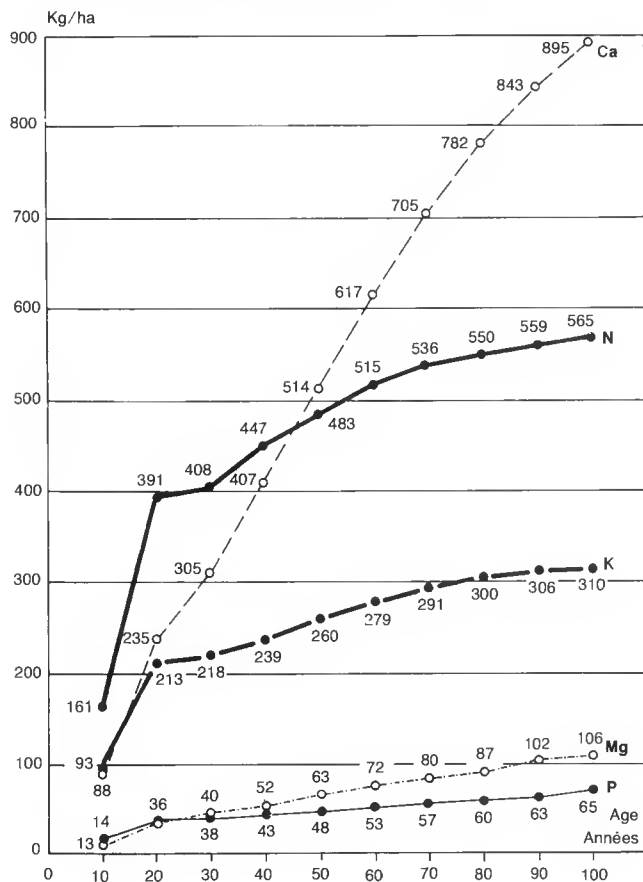


Figure 4 : ÉVOLUTION EN FONCTION DE L'ÂGE DES ÉLÉMENTS INCORPORÉS DANS LA BIOMASSE SUR PIED OU EXPORTÉS EN ÉCLAIRCIE DANS UN PEUPLEMENT D'ÉPICÉA DE CLASSE IV (d'après Krapfenbauer et Buchleitner, 1981).

Cependant, si l'immobilisation annuelle dans les compartiments ligneux du peuplement est relativement modeste pour les essences traditionnelles (quelques kg de chaque élément/ha/an), le complexe absorbant subit, au long de la vie de la forêt, d'autres pertes : blocage dans les couches holorganiques non décomposées des moder et des mor, pertes par drainage ou ruissellement, stockage dans les feuillages persistants. Elles sont d'un ordre de grandeur non négligeable par rapport à l'immobilisation ligneuse et expliquent que le complexe absorbant puisse s'appauvrir plus ou moins du début à la fin de la révolution, malgré sa recharge permanente par les apports externes et par l'altération des minéraux du sol, phénomènes dont les ordres de grandeur ne sont pas non plus négligeables par rapport à la consommation des arbres.

Il en résulte qu'il est tout à fait insuffisant de raisonner l'évolution de la fertilité des sols en ne prenant en considération que les éléments stockés dans le bois. C'est en termes de bilan total que le problème doit être abordé et c'est malheureusement très délicat en raison de la difficulté de chiffrer certains postes de ce bilan, l'altération en particulier.

Insistons sur le fait que, dans les pages qui précèdent, aucune hypothèse n'a été formulée sur la manière dont est exploité le peuplement. Les seules références à une quelconque intervention humaine ont été de supposer implicitement qu'on avait affaire à un peuplement équienne et de préciser, pour les exemples chiffrés de bilan, qu'on avait ajouté à la biomasse finale les bois enlevés en éclaircie. Tous les phénomènes évoqués sont inhérents au fonctionnement du peuple-

ment et aux cycles naturels. Quelles que soient la technique et l'intensité d'exploitation choisies, l'incorporation des éléments dans la biomasse du peuplement et l'humus sera la même en fin de révolution, dès l'instant où le forestier a choisi l'essence et son âge d'exploitabilité.

Par contre le gestionnaire intervient puissamment en début de révolution par le choix de l'espèce cultivée, puis en fixant la durée de la révolution et finalement par la décision qu'il prend d'exporter hors de la forêt telle ou telle partie de la biomasse produite.

Dans un article ultérieur nous examinerons comment et dans quelles proportions ces décisions d'aménagement influent sur le bilan des éléments échangeables du sol.

J. RANGER M. BONNEAU

Station de Recherches sur les Sols forestiers
et la Fertilisation

CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES FORESTIÈRES (I.N.R.A.)
Champenois 54280 SEICHAMPS

BIBLIOGRAPHIE

- AUSSENAC (G.), BONNEAU (M.), LE TACON (F.). — Restitution des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans 4 peuplements forestiers de l'Est de la France. — *Oecologia Plantarum*, vol. 7, 1972, pp. 1-21.
- BORDMANN (B.J.), DE BELL (D.S.). — Nitrogen content and other soil properties related to age of red alder stands. — *S. Sci. soc. of America Journal*, vol. 45, n° 2, 1981, pp. 428-432.
- BOYLE (J.R.), PHILLIPS (J.J.), EK (A.R.). — Whole tree harvesting nutrient budget evaluation. — *Journal of forestry*, vol. 22, 1973, pp. 760-762.
- BRINGMARK (L.). — A bioelements budget of an old Scots pine forest in central Sweden. — *Silva fennica*, vol. 11, n° 3, 1977, pp. 201-257.
- CARLISLE (A.), BROWN (A.H.F.), WHITE (E.J.). — The nutrient content of rainfall and its role in the forest nutrient cycle. — XIV^e Congrès I.U.F.R.O., Munich, vol. II, 1967, pp. 145-148.
- CLAYTON (J.L.). — Nutrient supply to soil by rock weathering in : Al Leaf (ed.) : Impact of intensive harvesting on forest nutrient cycle. Proc. Symp. Suny college env. Sci., For. St. University of New York. Syracuse (U.S.A.) 1979.
- DUVIGNEAUD (P.), DENAYER-DESMET (S.), AMBROE (P.), TIMBERMAN (J.). — Recherches sur l'écosystème forêt. Série B. La chênaie mélangée calcicole de Virelles-Blaimont. Aperçu préliminaire sur les biomasses, la productivité et le cycle des éléments biogènes. — *Bull. Soc. Roy. Bot. de Belgique*, vol. 102, n° 2, 1969, pp. 317-327.
- HENDERSON (G.S.), HARRIS (W.F.). — An ecosystem approach to characterization of the nitrogen cycle in a deciduous forest watershed. — In : Bernier « Forest soils and forest land management ». Les Presses de l'Université LAVAL (Québec), 1975, pp. 179-193.
- HOFFMANN (G.). — Die Stickstoffbindung der Robinie (*Robinia Pseudoacacia*). — *Arch. Forstw.*, vol. 10, 1961, pp. 627-632.
- KREUTZER (K.). — Effect of growth in the next rotation of the harvesting of a larger part of the forest biomass. — *Symposium on the harvesting of a larger part of the forest biomass*, Hyvirkää Finland, 1976.
- LEMÉE (G.), BICHAUT (N.). — Recherches sur les écosystèmes des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. II. - Décomposition de la litière des feuilles des arbres et libération des bioéléments. — *Oecologia Plantarum*, vol. 8, n° 2, 1973, pp. 153-174.

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

- LEMÉE (G.). — Recherches sur les écosystèmes des réserves biologiques de la forêt de Fontainebleau. IV - Entrée d'éléments minéraux par les précipitations et transfert au sol par pluviollessivage. — *Oecologia Plantarum*, vol. 9, n° 3, 1974, pp. 187-200.
- LOSSAINT (P.), RAPP (M.). — Le cycle du carbone dans les forêts de *Pinus halepensis*. — In : « Productivité des écosystèmes forestiers ». U.N.E.S.C.O. Actes du colloque de Bruxelles (Ecologie et conservation), vol. 4, 1969, pp. 213-216.
- MALVOS (C.). — Rôle du potassium et du phosphore sur la croissance des reboisements de *P. Kesiya* à Madagascar. — Thèse Doct. Ing, Université de Nancy I, 1980.
- MILLER (R.B.). — Plant nutrients in hard beech. II - The immobilization of nutrients. III - The cycle of nutrients. — *N.Z.J. Sci.*, vol. 6, 1963, pp. 365-423.
- NYS (C.), RANGER (D.), RANGER (J.). — Etude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises. III. - Minéralomasse et cycle biologique. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 40, n° 1, 1983, pp. 1-116.
- OHTA (S.), KELLER (R.), JANIN (G.). — Effets de divers modes de fertilisation (N, P, K) sur certaines caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et propriétés papetières du Pin maritime des Landes (*Pinus pinaster* Ait.) — *Annales des Sciences forestières*, vol. 40, n° 3, 1983, pp. 283-298.
- OTTORINI (J.M.). — Méthode de détermination d'une biomasse foliaire par échantillonnage. — Champenoux : I.N.R.A.-C.N.R.F., Station de Sylviculture et de Production, Document interne, 1974.
- RANGER (J.). — Recherches sur les biomasses comparées de deux plantations de Pin Laricio de Corse avec ou sans fertilisation. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 35, n° 2, 1977, pp. 95-115.
- RANGER (J.). — Etude de la minéralomasse et du cycle biologique dans deux plantations de Pin Laricio de Corse, avec ou sans fertilisation. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 38, n° 1, 1981, pp. 127-158.
- RAPP (M.). — Cycle de la matière organique et des éléments minéraux dans quelques écosystèmes méditerranéens. In « Caractéristiques pédologiques en climat méditerranéen et tempéré ». — P.B.I. Recherche coopérative sur programme n° 40 du C.N.R.S., Editions C.N.R.S., Paris, 1971.
- REHFUESS (K.E.). — Ernährung und Wachstum der Dauerlupine (*Lupinus polyphyllus* L.) unter Kiefernschirm auf Oberpfälzer Standorten. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 84, n° 9/10, 1965, pp. 265-292.
- REMACLE (J.). — Microbial transformation of nitrogen in forests. — *Oecologia Plantarum*, vol. 12, n° 1, 1977, pp. 33-43.
- SWITZER (G.), NELSON (L.E.), SMITH (W.H.). — The mineral cycle in forest stands. — In : « Forest fertilization, theory and practice ». Tennessee Valley Authority, 1968.
- ULRICH (B.). — Influence de la fertilisation sur le cycle des éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers. — Symposium International F.A.O.-I.U.F.R.O. sur l'utilisation des engrais en forêt, Paris, 1973, pp. 23-33.
- WOOD (B.W.), WITTWER (R.F.), CARPENTER (S.B.). — Nutrient element accumulation and distribution in an intensively cultivated 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. LE CYCLE BIOLOGIQUE EN FORÊT (Résumé)

La mise en pratique progressive de cultures forestières plus intensives, dont la production est plus complètement récoltée que dans les années antérieures, pose le problème du maintien de la fertilité des sols de forêt.

Ce premier article sur le sujet présente d'abord en termes généraux les différents compartiments et flux du cycle biologique en forêt et la possibilité pratique de les évaluer ; il donne ensuite quelques chiffres concrets sur l'immobilisation d'éléments dans les parties ligneuses des peuplements, sur les apports au sol forestier par les pluies et poussières, et sur la recharge du complexe absorbant par altération. Enfin, on présente une formulation de l'évaluation générale du stock d'éléments assimilables au cours de la vie du peuplement et on en donne deux exemples chiffrés.

PREDICTABLE EFFECTS OF INTENSIFYING PRODUCTION AND HARVESTING ON THE FERTILITY OF FOREST SOILS. THE BIOLOGICAL CYCLE IN THE FOREST (Summary)

More intensive methods are increasingly being practised for the growing of forests, whose produce is being more completely harvested than in former times ; this poses the problem of maintaining the fertility of the forest soils.

This first article on the subject begins by setting out, in general terms, the various components of the biological cycle in the forest, their movement, and the practical possibilities for evaluating them. It goes on to give some actual figures for the elements locked up in the woody parts of the stand, on the inputs to the forest soil from rain and dust, and on the recharging of the absorptive complex by weathering. Finally, a general method is formulated for evaluating the stock of assimilable elements throughout the life of the stand ; two numerical examples are given.

VORAUSSICHBARE AUSWIRKUNGEN DER PRODUKTIONS- UND ERNTEINTENSIVIERUNG AUF DIE FRUCHTBARKEIT DER WALDBÖDEN. DER LEBENSZYKLUS IM WALD (Zusammenfassung)

Die progressive Intensivierung der Forstbestände, deren Produktion vollständiger geerntet wird als in den vergangenen Jahren, wirft das Problem der Erhaltung der Fruchtbarkeit der Waldböden auf.

Dieser erste Artikel zu diesem Thema stellt zunächst ganz allgemein die verschiedenen Abteilungen und Abläufe des Lebenszyklus des Waldes dar und die praktische Möglichkeit ihrer Einschätzung; er gibt danach einige konkrete Zahlen über die Immobilisierung von Elementen in den verholzten Teilen der Bestände, über die Anreicherung des Waldbodens durch Regen und Staub und über die Aufladung des Sorptionskomplexes durch Veränderung. Zum Schluss wird eine Formulierung der Gesamtschätzung des Vorrats an — im Laufe eines Bestandeslebens — assimilierbaren Elementen dargelegt, sowie zwei Beispiele mit Zahlenangaben.

EFFECTOS PREVISIBLES DE LA INTENSIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE LAS COSECHAS SOBRE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS DEL BOSQUE. EL CICLO BIOLÓGICO EN EL BOSQUE (Resumen)

La puesta en práctica progresiva de cultivos forestales más intensos, cuya producción es cosechada más completamente que en los años precedentes, plantea el problema del entretenimiento de la fertilidad de los suelos del bosque.

Este primer artículo sobre tal tema presenta primeramente en términos generales los diferentes compartimentos y el flujo biológico en el bosque y la posibilidad práctica de evaluarlos; da después algunas cifras concretas sobre la inmovilización de elementos en las partes leñosas de las plantaciones, sobre las aportaciones al suelo forestal por las lluvias y polvaredas y sobre la recarga del complejo absorbente por alteración. En fin, se presenta una formulación de la evaluación general del depósito de elementos asimilables, al correr de la vida de la plantación y se dan dos ejemplos cifrados.

Du nouveau à Nancy chez les économistes de l'Institut national de la Recherche agronomique

Créé en 1973, le Laboratoire d'Economie Forestière rattaché au Département d'Economie et de Sociologie Rurales de l'I.N.R.A., et situé au centre de Nancy de l'E.N.G.R.E.F., qui avait été dirigé jusqu'à l'année dernière par Joanny Guillard, étend son champ de recherches à l'ensemble de l'économie rurale, et se transforme désormais en :

LABORATOIRE D'ÉCONOMIE FORESTIÈRE ET AGRICOLE
DE L'I.N.R.A., à L'E.N.G.R.E.F., 14, rue Girardet,
54042 NANCY CEDEX. Tél. : (8) 335.43.06.

Gérard Buttoud est chargé de la direction du laboratoire ainsi redéfini, dont les travaux actuels portent sur les thèmes suivants :

- Le revenu des agriculteurs (J.-P. Butault).
- La situation économique des élevages laitiers (J.-P. Butault).
- La politique française de la chasse (G. Buttoud).
- Les échanges mondiaux en bois et produits dérivés ; économie internationale et géopolitique (G. Buttoud).
- L'exploitation forestière et l'approvisionnement en bois des industries (B. Elyakime).
- L'emploi en forêt (B. Elyakime).
- Les structures de la sylviculture ; peuplements et propriétaires (D. Normandin).
- L'offre de bois en forêt (D. Normandin).

Le Laboratoire d'Economie Forestière et Agricole de l'I.N.R.A., qui est désormais équipé de moyens de traitement informatique, organise tous les deux ans un séminaire d'économie forestière qui est consacré à un thème et qui constitue un lieu privilégié de rencontres entre chercheurs et professionnels. Il contribue par ailleurs à l'enseignement et à l'encadrement d'étudiants de l'E.N.G.R.E.F. Tous renseignements concernant les travaux actuels et les publications récentes sont à demander au laboratoire.