

Bois-énergie : craintes sur l'appauvrissement des sols dû à l'intensification des prélèvements en situation de culture extensive

Wood for energy: intensified harvests can lead to soil impoverishment in extensively managed forests

Manuel NICOLAS*, Jacques RANGER**

Résumé

Bien qu'il soit considéré comme une énergie propre au regard des émissions de gaz à effet de serre, le développement du bois-énergie doit être raisonné pour ne pas compromettre la fertilité des sols et la durabilité de la ressource forestière française. En effet, la consommation croissante de bois-énergie, encouragée par des politiques incitatives, pousse à intensifier l'exploitation forestière en convoitant notamment des bois de dimension de plus en plus réduite et habituellement laissés sur coupe (rémanents). Or ces bois de houppiers, et plus encore les feuilles, concentrent une grande quantité d'éléments nutritifs qui ne retournent pas au sol s'ils sont exploités. Un appauvrissement est à craindre en particulier pour les sols acides dont le recyclage des matières organiques constitue la principale source d'éléments nutritifs. Le sol occupant une place centrale dans l'écosystème, sa dégradation peut se répercuter sur la productivité, l'état sanitaire et la biodiversité des forêts. En l'absence d'apports fertilisants, les volumes de menus bois mobilisés doivent donc être limités à ce que les ressources nutritives des sols sont à même de supporter durablement. Des outils d'aide à la gestion sont disponibles pour diagnostiquer simplement la sensibilité des sols et définir des possibilités d'exploitation de menus bois. Réciproquement,

l'apport d'amendements minéraux s'avère efficace pour restaurer à moyen terme le fonctionnement de sols appauvris, au bénéfice des écosystèmes ainsi que de la production de bois. Pour conclure, on peut intensifier l'exploitation forestière à des fins énergétiques dans le cadre d'une gestion durable mais en raisonnant cet effort et les moyens de mobilisation selon la fertilité minérale du sol et la sensibilité de l'écosystème forestier dans son ensemble.

Abstract

Wood is considered as a renewable source of energy as it balances carbon dioxide emission and sequestration. However biomass production needs to extract nutrients from soil and intensifying wood harvests in order to satisfy rising demand for fuelwood could lead to soil impoverishment in extensively managed forests. That, in turn, could limit future wood production but also threat forest ecosystem sustainability.

The soil is a nutrient store. Nutrient uptake by vegetation is naturally balanced by the decomposition of organic matter and the release of its mineral compounds to the soil. This cycling process is the main supply of nutrients for acid soils and allows them to support productive high forests in spite of



* Ingénieur à l'interface ONF-INRA – Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers – INRA – Centre de Nancy – 54280 Champenoux – E-mail : mnicolas@nancy.inra.fr

** Directeur de recherche – Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers – INRA – Centre de Nancy, 54280 Champenoux – E-mail : ranger@nancy.inra.fr

high mineral uptake by trees. But this process is also very sensitive to intensive wood harvesting, which can considerably reduce the reserve of an acid soil in a few decades.

Thus the sustainable forest management needs to adapt the amount of harvested wood to the existing mineral resource. It is especially important to limit the extraction of fine wood and foliage material, which have much higher nutrient concentrations than stem wood. Soil fertility is highly variable and must be diagnosed before determining the harvest possibilities. Rich soils can support occasional slash exports but acid soils (pH < 4.5 at soil surface) must be preserved from this kind of practice. Guidelines

with easy diagnostic tools for sustainable slash management are available to all foresters and private owners.

Conversely, liming can be practiced on acid or impoverished soils in order to restore biological activity and accelerate nutrient cycling. Only 2 t crushed limestone per hectare is needed to efficiently improve mid-term soil fertility, tree health and production.

At last, we certainly can intensify wood harvesting in extensive forests for a sustainable supply of fuelwood but the amount and the means of this additional wood extraction must be based on soil fertility and sensitivity.

Glossaire

Symboles chimiques des éléments nutritifs majeurs

N : azote. P : phosphore. K : potassium. Ca : calcium. Mg : magnésium.

1. Introduction

À l'heure de Kyoto, le bois s'entend comme une ressource énergétique durable, en assurant un équilibre entre sources et puits de carbone atmosphérique. Cependant, bien qu'elle séquestre de grandes quantités de carbone, la production de biomasse végétale implique également la ponction d'éléments nutritifs du sol et peut amener un risque d'appauvrissement conséquent si elle n'est pas raisonnée. Comme souvent, une solution peut créer de nouveaux problèmes tout aussi importants que ceux auxquels elle est censée répondre.

Avant la révolution industrielle et l'utilisation de charbon et de pétrole, la recherche d'énergie a conduit nos ancêtres à surexploiter la ressource forestière, la rotation des taillis ayant communément été réduite à moins de dix ans pour subvenir aux besoins des forges et des verreries, la production de charbon, ou encore le feuillardage. Aujourd'hui, si le développement des taillis à courte (TCR) ou très courte révolution (TTCR) est de nouveau évoqué pour subvenir à des besoins accrus en biomasse, ces cultures très intensives bénéficient systématiquement d'apports fertilisants, indispensables au maintien d'une forte productivité.

En revanche, pour la majorité des forêts françaises, gérées de manière extensive et sans intrants artificiels, l'intensification de l'exploitation de bois à des fins énergétiques doit être conduite avec discernement afin de préserver la fertilité des sols et la pérennité des écosystèmes. Il s'agit en particulier de raisonner la récolte des rémanents (menus bois habituellement laissés sur coupe) désormais convoités, en tenant compte des ressources nutritives des sols.

2. Pourquoi préserver la fertilité des sols forestiers ?

2.1. Rôles du sol dans la production et l'équilibre des écosystèmes

Milieu complexe à l'interface entre l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère, le sol est constitué de matières minérales solides, d'air, d'eau, de matières organiques et d'organismes vivants. Il assure plusieurs fonctions fondamentales pour les forêts :

- support physique dans lequel s'enracinent les arbres ;
- réservoir dans lequel la végétation puise l'eau et les éléments nutritifs dont elle a besoin ;
- habitat pour une faune très diverse et pour des micro-organismes décomposeurs permettant le recyclage des matières organiques.

Au-delà des forêts, il joue également un rôle important dans le stockage de carbone et sur la qualité des eaux de surface.

De fait, l'appauvrissement du sol peut affecter la production de bois mais plus généralement le fonctionnement de l'écosystème forestier et l'ensemble des fonctions environnementales et sanitaires auxquelles la fertilité du sol contribue.

2.2. D'où vient la fertilité chimique des sols forestiers ?

La fertilité chimique du sol tient à la quantité d'éléments nutritifs majeurs (N, P, K, Ca, Mg) qu'il contient sous forme disponible pour la végétation [1, 2]. Il s'agit d'éléments « échangeables », c'est-à-dire adsorbés sous forme d'ions minéraux (NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) à la surface de particules chargées électriquement (minéraux argileux, oxydes de fer et

d'aluminium, matières organiques). La disponibilité de ces éléments tient ainsi à leur capacité à passer facilement en solution et à être absorbés par les racines et les micro-organismes.

Il faut noter d'une part que les réserves en éléments échangeables sont très variables d'un sol à l'autre, pouvant par exemple varier d'un facteur 100 pour les cations alcalins (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) entre un sol acide et un sol calcique.

D'autre part, le réapprovisionnement d'un sol en éléments nutritifs (et donc la capacité de ses réserves à supporter un appauvrissement) dépend des apports et des pertes qu'il subit. La principale différence de réapprovisionnement entre les sols tient à l'apport par altération de leurs minéraux : en d'autres termes, un sol développé sur une roche riche et rapidement altérable (ex. : calcaire, basalte...) bénéficie d'apports bien plus importants qu'un sol reposant sur une roche pauvre et/ou difficilement altérable (ex. : grès, schiste...).

Toutefois, on constate que la production forestière peut être importante y compris sur des sols pauvres (ex. : forêts des Vosges ou des Ardennes). Cela s'explique par le recyclage efficace des éléments nutritifs au sein de l'écosystème. Mais cette capacité de circulation rapide d'une quantité réduite d'éléments nutritifs entre le sol et les arbres peut être aisément affectée par l'exploitation forestière.

2.3. Le cycle des éléments nutritifs en forêt

Au sein d'un écosystème forestier, les arbres absorbent dans le sol la partie disponible des éléments nutritifs qui sont ensuite distribués dans leurs différents organes (tronc, branches, feuilles...). À la mort de ces organes, les éléments nutritifs retournent au sol avec la litière qui est décomposée, rendant ces éléments de nouveau disponibles pour les racines des arbres. Chaque année la majeure partie des éléments prélevés par les arbres peut ainsi retourner au sol [3].

Ce cycle, dit biologique, est la principale source d'éléments nutritifs des écosystèmes sur sols pauvres. Les besoins importants des arbres en nutriments peuvent ainsi être satisfaits durablement malgré des réserves disponibles dans le sol qui ne représentent souvent que quelques dizaines d'années – mais parfois seulement quelques années – de prélèvement par les racines.

En exportant les éléments nutritifs contenus dans le bois (Figure 1), l'exploitation forestière réduit le retour au sol de nutriments et peut mettre à mal l'équilibre de l'écosystème. Si les pertes d'éléments nutritifs dépassent les capacités de réapprovisionnement extérieur des sols (notamment les apports par altération des minéraux), le stock d'éléments échangeables du sol s'amenuise. À terme c'est la santé et la production des arbres (carences, vulnérabilité accrue aux stress, croissance ralentie) mais, plus largement, l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème qui peuvent être affectés.

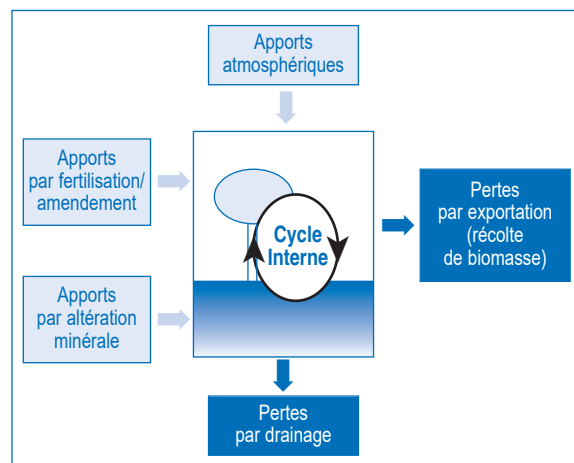


Figure 1.

Schéma des flux d'éléments au sein et autour de l'écosystème forestier. Le bilan minéral de l'écosystème se calcule pour chaque élément par la différence entre les apports et les pertes extérieures.

3. Bois-énergie : quelles conséquences sur la fertilité des sols ?

3.1. Bois-énergie et intensification de l'exploitation forestière

La demande croissante de bois, en particulier pour la fourniture d'énergie renouvelable, pousse à intensifier l'exploitation forestière. Il s'agit notamment de mobiliser des bois de dimension de plus en plus réduite, comme les branches habituellement laissées sur le parterre des coupes (rémanents). Or ces branches (et plus encore les feuillages) concentrent dans un faible volume la majeure partie des éléments nutritifs contenus dans les arbres [4] (figure 2). De ce fait, l'exploitation des branches en plus des troncs peut accroître fortement les exportations d'éléments nutritifs hors de l'écosystème pour un faible gain en biomasse utile. Notons sur l'exemple d'un peuplement Douglas de 20 ans – âge des premières éclaircies – que la récolte des branches en plus des troncs permet la mobilisation de 25 % de biomasse supplémentaire mais entraîne une exportation minérale accrue de 2/3 pour l'azote et multipliée par 3 pour le calcium. Et ce déséquilibre s'accroît encore nettement si les feuillages sont exportés. En outre, ce type d'exploitation entraîne une contrainte d'appauvrissement d'autant plus importante qu'il ponctionne le cœur du cycle interne des éléments, les parties les plus fines des arbres étant aussi celles qui se décomposent et libèrent le plus vite leur contenu minéral au sol.

Les conséquences d'une contrainte d'appauvrissement accrue sur les sols peuvent être très variables suivant leurs ressources minérales. Les sols bénéficiant d'apports d'éléments importants pourront durablement supporter des exportations importantes tandis que les réserves des sols pauvres peuvent devenir limitantes en moins d'une révolution forestière.

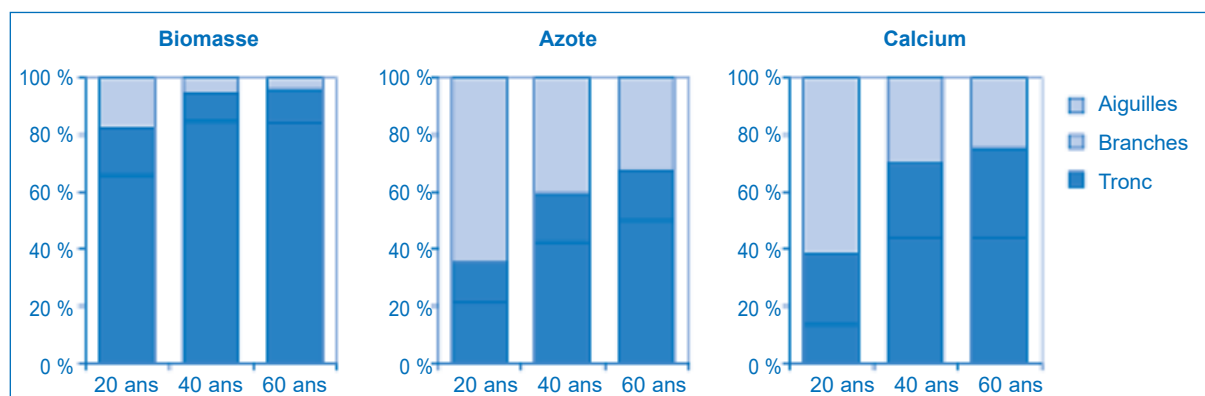


Figure 2.

Distribution relative de la biomasse et de la minéralomasse d'azote et de calcium entre le tronc, les branches et les aiguilles de trois plantations de Douglas de 20, 40 et 60 ans – d'après Ranger *et al.* [4]. Les aiguilles et les branches constituent une faible part de la biomasse de l'arbre mais concentrent la majeure partie des éléments nutritifs.

3.2. Quelles conséquences sur l'écosystème ? Un exemple au Congo

Les effets de l'intensification de l'exploitation forestière ont été étudiés au Congo dans une plantation d'eucalyptus sur sol très pauvre [5]. Six traitements différents ont été appliqués par plateaux de 0,26 ha au moment de la récolte d'une première révolution d'eucalyptus, suivant un dispositif répété en quatre blocs. Puis un nouveau peuplement a été planté, à densité de 800 tiges/ha, et suivi pendant une nouvelle révolution de sept ans. Les six modalités de récolte comparées sont les suivantes :

- BL0 : exportation totale des matières organiques (rémanents, sous-bois et litière) ;
- BL1 : exploitation des arbres entiers (tronc, écorce, branches et feuillage) ;
- BL2 : exploitation du tronc seul (bois + écorce), branches et feuillage restant au sol ;
- BL3 : doubles rémanents : exploitation du tronc seul (comme BL2) mais les branches et feuillages ôtés de BL1 sont ajoutés sur le sol ;
- BL4 : exploitation des troncs écorcés, suivant les pratiques locales habituelles ;
- BL5 : brûlis : exploitation des troncs écorcés mais les rémanents et la litière sont brûlés avant replantation.

Les résultats indiquent que la productivité des peuplements dépend nettement du traitement des résidus d'exploitation (Tableau 1). On note une relation forte entre la quantité de matières organiques laissées sur le parterre de coupe à l'issue de la première révolution et le volume sur pied à la fin de la seconde (Figure 3) : moins on a laissé de biomasse au sol lors de la coupe et moins la nouvelle plantation est productive.

Par ailleurs, si le brûlage des rémanents (BL5) n'induit pas de perte significative d'accroissement moyen par rapport à leur simple étalage au sol (BL4)

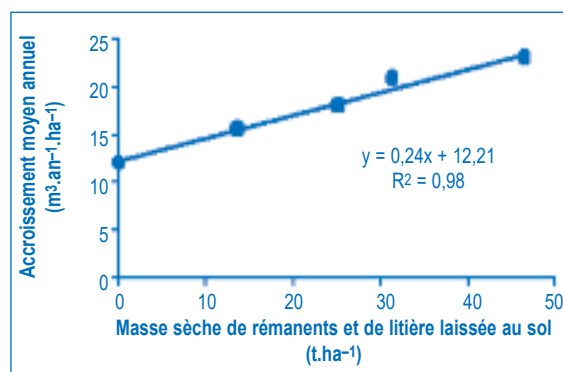


Figure 3.

Relation entre la masse sèche de matières organiques laissées sur le parterre de coupe à l'issue d'une première révolution d'eucalyptus et l'accroissement moyen annuel de la seconde révolution mesuré sur 7 ans. Le traitement BL5 où les résidus d'exploitation ont été brûlés n'est pas représenté – d'après Deleporte *et al.* [5].

après sept ans, il faut tout de même noter pour ce traitement que la croissance diminue fortement à la fin de la révolution après un démarrage très rapide (effet « starter »). En provoquant la volatilisation de certains de leurs éléments (N, P) et en augmentant la mobilité et donc le drainage des cations alcalins (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), la combustion des matières organiques engendre une perte significative de productivité à plus long terme. L'étude de ce site doit se poursuivre afin d'identifier les effets cumulatifs des traitements et de déterminer les seuils de basculement de l'écosystème.

Cet exemple congolais a été choisi pour illustrer la déstabilisation extrêmement rapide d'un écosystème sous l'effet d'une gestion mal adaptée. C'est un cas extrême : la fertilité chimique du sol, très pauvre, dépend très fortement de la dynamique de la matière organique fraîche et la très forte productivité d'une

Tableau 1.
Effets de six modalités de traitement des résidus d'exploitation d'une plantation d'eucalyptus sur la croissance du peuplement planté par la suite – d'après Deleporte *et al.* [5].

		Modalités de traitement des résidus d'exploitation					
		BL0	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5
Masse de rémanents et de litière laissée au sol après coupe (t.ha ⁻¹)		0,0	13,7	25,2	46,5	31,4	–
Mesure de la plantation suivante après sept ans	Hauteur moyenne (m)	20,2c	21,9bc	22,6ab	24,4a	23,6ab	23,0ab
	Diamètre moyen à 1,30 m (cm)	11,7c	13,1bc	14,0ab	15,4a	14,7ab	13,8abc
	Accroissement annuel moyen (m ³ .ha ⁻¹ .an ⁻¹)	12,0c	15,6bc	18,0ab	23,0a	20,9ab	18,1ab

Les lettres a, b et c indiquent des différences significatives ($p < 0,05$) entre traitements suivant un test de Bonferroni.

plantation d'eucalyptus induit une exportation d'éléments nutritifs très rapide. Cependant les mécanismes qui sous-tendent l'appauvrissement des sols forestiers sont les mêmes en zone tempérée et, même si les effets à attendre d'une intensification de l'exploitation seront plus lents, ils seront similaires.

4. Sensibilité des sols des forêts extensives en France

4.1. Le contexte actuel

En France métropolitaine, dans les forêts majoritairement gérées de manière extensive, les risques d'appauvrissement portent principalement sur les cations alcalins (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) en contexte de sol acide. L'acidification du sol favorisée par la perte de cations alcalins – remplacés par des cations acides (H⁺, Al³⁺) – peut alors affecter la nutrition minérale des arbres, la résistance des peuplements aux stress mais aussi l'activité biologique du sol et le recyclage même des matières organiques, comme on l'a notamment observé dans les forêts des Vosges dans les années 1980 après les épisodes de pluies acides [6]. L'acidification des sols peut également se prolonger en aval par l'acidification des eaux de surface [6] en entraînant :

- une augmentation des concentrations en aluminium [7] et métaux lourds (comme le plomb) dans les captages d'eaux potables [8] ;
- une diminution de la biodiversité des cours d'eau, à l'exemple de la disparition des truites de nombreux ruisseaux vosgiens [7] ou de la réduction du nombre d'espèces d'invertébrés [9] et de champignons aquatiques [10] ;
- une altération du fonctionnement écologique des ruisseaux forestiers [11].

Par ailleurs, la disponibilité de l'azote (N) est fortement améliorée par des apports atmosphériques conséquents et ne serait limitante que localement ou dans le cas de lignicultures intensives. En revanche, ces retombées d'azote, principalement dues aux pollutions automobile et agricole, ont un effet acidifiant toujours sensible sur les sols pauvres [12].

Enfin, le phosphore (P), bien qu'étant très conservatif au sein des écosystèmes, pourrait devenir limitant en dehors des systèmes intensifs, notamment pour des écosystèmes forestiers sur sols acides [13]. Sa dynamique est cependant plus difficile à mesurer que pour les autres éléments et les connaissances à son sujet sont encore limitées.

4.2. Les connaissances acquises par les bilans de fertilité

Les bilans de fertilité permettent de prévoir une détérioration de l'état de l'écosystème avant que les dégâts ne soient nécessairement réalisés. Ils consistent à sommer l'ensemble des flux d'éléments entrant et sortant de l'écosystème (apports atmosphériques, apports par altérations minérales, pertes par drainage, pertes par exportation de bois) pour déterminer son état d'équilibre. La quantification de ces flux requérant une instrumentation très lourde et un suivi continu sur plusieurs années, le nombre de sites bénéficiant d'un bilan de fertilité complet demeure limité.

Les bilans minéraux évalués en France sur des sites expérimentaux sur sols acides indiquent le plus souvent le calcium et le magnésium comme les éléments les plus limitants et dont les réserves dans le sol sont déjà mises à contribution par l'exploitation conventionnelle des troncs seuls [14-16].

Le site de Vauxrenard (Monts du Beaujolais) [4, 14, 17] permet en plus d'estimer les exportations supplémentaires pouvant résulter de la récolte des branches sur une révolution de Douglas de 60 ans (Tableau 2) : la dynamique d'appauvrissement en calcium et magnésium est alors nettement accélérée et étendue au potassium et au phosphore. Bien entendu, cela ne signifie pas que l'appauvrissement se poursuivra au même rythme jusqu'à ce que les arbres meurent brutalement de carences mais qu'une perte de production et une fragilisation du peuplement face aux stress seront à prévoir rapidement. Il est donc important de préserver ce type de sol d'une exploitation intensifiée.

Par ailleurs, il est important de noter que de nombreuses plantations ont été réalisées au cours du

Tableau 2.

Bilan minéral calculé pour une révolution de 60 ans de Douglas sur le site d'étude de Vauxrenard – d'après Ranger *et al.*, [4, 14, 17]. Le bilan minéral d'un écosystème se calcule pour chaque élément par la différence entre les apports et les pertes extérieurs.

Mode d'exploitation		Biomasse (t/ha/an)	N (kg/ha/an)	P (kg/ha/an)	K (kg/ha/an)	Ca (kg/ha/an)	Mg (kg/ha/an)
Apports atmosphériques			20,3	1,0	3,2	7,3	1,1
Altération			0	0	14	1,8	2,5
Drainage			- 21,3	- 0,3	- 13,2	- 13,5	- 5,0
Exportations (prélèvements)	Tronc seul	- 6,7	- 6,7	- 0,5	- 3,3	- 4,4	- 0,6
	Arbre entier	- 0,8	- 14,2	- 1,2	- 5,7	- 10,8	- 1,2
Bilan minéral	Tronc seul		- 7,7	0,2	0,7	- 8,7	- 2,0
	Arbre entier		- 15,2	- 0,5	- 1,8	- 15,2	- 2,6
Stocks échangeables du sol sur 120 cm de profondeur (kg/ha)			non mesuré	800	640	550	200

siècle dernier sur d'anciennes terres agricoles ayant fait l'objet d'apports fertilisants. Dans ce cas, les premières générations ont manifestement bénéficié d'une fertilité artificielle pouvant masquer un faible réapprovisionnement naturel des sols. Les possibilités de production durable de bois peuvent alors être surestimées si l'on ne s'en tient qu'à l'évaluation des réserves échangeables.

Enfin, même en dehors de toute perspective d'intensification de l'exploitation, les bilans négatifs en calcium et magnésium calculés sur plusieurs sites d'étude posent la question de l'opportunité de restaurer plus largement la fertilité chimique des sols forestiers acides par amendement.

4.3. Retours d'expériences d'amendement

Réciproquement, les expériences d'amendements calcaires et dolomitiques, réalisées sur sols forestiers acides, aboutissent généralement à l'amélioration de l'état sanitaire des peuplements et à une augmentation de leur productivité [1, 18]. L'exemple du site de Breuil (Morvan) nous renseigne plus en détail sur les effets d'un amendement sur l'ensemble du fonctionnement d'un écosystème.

Sur ce site de moyenne montagne, le sol acide et filtrant développé sur granite alcalin est très pauvre en éléments nutritifs (40 kg/ha de Ca et Mg sur 70 cm de sol). Il supporte la forêt feuillue morvandelle, épuisée par la récolte de bois de chauffe pour la ville de Paris jusqu'au début du ^{xx}e siècle. Les reboisements post seconde guerre mondiale conduisent à la substitution de plantations résineuses au taillis sous futaie natif. L'introduction d'essences résineuses à croissance rapide laisse augurer d'une dégradation du sol par acidification. D'emblée, il est décidé de tester, en plus de la comparaison d'essences, l'amélioration *a priori* de la fertilité du sol par fertilisation et amendement : 100 unités de P et 800 de Ca sont apportées par hectare trois ans après la plantation.

Vingt-cinq ans après cette application, les peuplements d'une trentaine d'année montrent l'efficacité remarquable de cet apport : + 20 et + 50 % de biomasse de bois de tronc respectivement pour l'Épicéa et le Douglas. De plus, les peuplements fertilisés conservent une très bonne réactivité à l'éclaircie, retrouvant une forte croissance après une stagnation due à une mauvaise gestion de leur structure.

L'étude détaillée des cycles biogéochimiques montre que la végétation a réagi à l'amélioration de la disponibilité en éléments du sol, mais que les autres fonctions du sol ont également été restaurées. En particulier, l'excédent de nitrates produits par rapport à la consommation du peuplement végétal ne semble pouvoir être fixé dans l'écosystème que lorsque certains autres éléments importants pour la microflore sont présents : le calcium mais aussi le phosphore sont essentiels à cet égard. Par conséquent, amender le sol et rétablir l'équilibre nutritif est essentiel pour maintenir les fonctions du sol, la production mais aussi la qualité de l'environnement. À Breuil, les sols amendés ne montrent plus de migration de nitrate et d'aluminium toxique vers les eaux de surface.

5. Recommandations

5.1. Limiter les exportations d'éléments nutritifs à ce que peuvent supporter les sols

Le principe à respecter par le gestionnaire forestier pour éviter tout risque d'appauvrissement est de limiter les exportations d'éléments nutritifs à ce que peuvent supporter les sols. Sur ce principe, l'ADEME a publié un guide pratique [19] permettant à tout propriétaire ou gestionnaire forestier de déterminer la possibilité d'exploitation de rémanents. Ce guide se présente en deux parties :

- une typologie simple distinguant trois classes de sensibilité des sols aux exportations nutritives suivant

des critères quantifiables (pH de l'horizon A en surface) ou bien des indicateurs stationnels facilement observables sur le terrain (texture du sol, forme d'humus, relevé d'espèces végétales indicatrices) ;

- des recommandations en termes de fréquence possible d'exploitation de rémanents durant la vie du peuplement et, si nécessaire, de doses de fertilisation compensatoire, pour chaque classe de sensibilité de sol.

Dans tous les cas, ce guide indique de laisser les feuillages sur le parterre de coupe, soit en laissant sécher plusieurs mois les rémanents sur coupe avant de les récolter, soit en exploitant les branches d'essences feuillues en hiver. En outre, même dans le cas des sols les plus riches ou de récoltes de rémanents compensées par fertilisation, une limite maximale est retenue de deux récoltes dans la vie du peuplement, afin de prendre en compte d'autres impacts potentiels de ce type d'exploitation, notamment sur la biodiversité (cf. 5.3).

Par ailleurs, l'Inventaire forestier national (IFN) et le Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB) – INRA-AgroParisTech ont réalisé récemment une carte de pH des sols forestiers de France au pas kilométrique. En appliquant à cette carte les classes de sensibilité de sol du guide ADEME puis en la croisant avec l'information d'occupation des sols de la base CORINE Land Cover, on remarque qu'une minorité des surfaces forestières françaises (14 %), constituée principalement de résineux, est située sur des sols fortement sensibles (pH < 4,5) et doit être préservée de toute intensification de l'exploitation. À l'inverse, 57 % des forêts sont situées sur des sols peu sensibles (pH ≥ 5,5), ce qui peut fournir un volume conséquent de biomasse, même en se limitant à deux récoltes de branches au cours de la vie du peuplement.

5.2. Restaurer la fertilité des sols dégradés par amendement et/ou fertilisation

Il est possible de restaurer efficacement la fertilité chimique et le fonctionnement biologique de sols appauvris par apport d'amendements minéraux ou de fertilisants. Les doses à apporter sont à évaluer en fonction des réserves du sol et des besoins du peuplement pour éviter de créer un déséquilibre nutritif [2]. Ces doses toujours faibles (1 à 2 t de dolomie broyée, additionnée de 150 kg de K et 100 kg de P

par ha à la plantation) – il n'est pas question de faire changer le sol de catégorie de fertilité – re-dynamisent l'écosystème en remettant en circulation un volant d'éléments qui échappaient au recyclage interne. Leur activité dure longtemps comme le montre l'exemple de Breuil : le phosphore est très conservatif dans les sols (pas de drainage) et le calcium est très fortement recyclé.

5.3. Prendre en compte les autres impacts de l'exploitation accrue de biomasse

L'exploitation intensifiée de biomasse peut engendrer d'autres impacts sur le sol et sur l'écosystème qu'il convient également de prendre en compte.

En premier lieu, comme évoqué plus haut, le maintien de bois mort en forêt est essentiel, de manière générale, à la préservation de la biodiversité [20]. Pour ce qui nous concerne plus particulièrement, il faut noter les rôles variés que jouent en ce sens les petits bois laissés au sol : ressource trophique pour de nombreuses espèces saproxyliques [21], protection isolante pour les semis ligneux et les organismes vivants à la surface du sol [22], abri pour les rongeurs [23] ou encore zone de nidification de certains oiseaux [24].

En outre, la récolte intensifiée de biomasse accroît le risque de dégradation physique (tassement, érosion) des sols, et ce pour deux raisons. D'une part, la mobilisation d'un volume de bois plus important implique des passages d'engins plus fréquents et/ou plus chargés, avec un risque d'autant plus élevé de débardage sur sol humide après une forte pluie. D'autre part, s'ils sont voués à l'exploitation, les rémanents ne peuvent être utilisés comme protection à la surface des sols pour limiter les dégâts de tassement. La sensibilité du sol aux dégradations physiques doit donc être définie [25] avant de choisir le système d'exploitation le mieux adapté.

Enfin, notons également que la récolte de rémanents peut avoir un impact positif face aux risques d'incendie dans les zones concernées. Pour les forêts concernées, un équilibre est à trouver entre la limitation du risque d'incendie et la conservation de la fertilité des sols et du fonctionnement des écosystèmes. Heureusement, la plus grande partie des forêts françaises situées en zone méditerranéenne reposent sur des sols calcaires.

References

1. Bonneau M. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Théorie, bases de diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales. ENGREF (Ed), Nancy 1995 : 367 p.
2. Brêthes A. Restaurer la fertilité et l'activité biologique des sols forestiers dégradés. 1. Impact des amendements basiques sur les sols et leur environnement. 2. Où, pourquoi et comment amender ? ONF, *Rendez-vous techniques* 2007 ; 18 : 58-72.
3. Ranger J, Gérard F, Lindemann M, Gelhaye D, Gelhaye L. Dynamics of litterfall in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stands in the Beaujolais mounts (France). *Ann for Sci* 2003 ; 60 (8) : 475-88.

4. Ranger J, Marques R, Colin-Belgrand M, Flammang N, Gelhaye D. The dynamics of biomass and nutrient accumulation in a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stand studied using a chronosequence approach. *Forest Ecology and Management* 1995 ; 72 : 167-83.
5. Deleporte P, Laclau JP, Nzila JD *et al.* Effects of slash and litter management practices on soil chemical properties and growth of second rotation Eucalypts in the Congo. *In* : Nambiar EKS (Ed). Site Management and productivity in tropical plantation forests. Proceedings of workshops in Piracicaba (Brazil) 22-26 November 2004 and Bogor (Indonesia) 6-9 November 2006. Center for International Forestry Research (CIFOR), Bogor 2008 : 236 p.
6. Landmann G, Bonneau M (Ed.). Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1995 : 461 p.
7. Probst A, Massabuau JC, Probst JL, Fritz B. Acidification des eaux de surface sous l'influence des précipitations acides : rôle de la végétation et du *substratum*, conséquences pour les populations de truites. Le cas des ruisseaux des Vosges. *Compte rendu Acad Sciences* 1990 ; 311, Série II : 405-11.
8. Dambrine E, Party JP, Pollier B *et al.* Acidification des eaux de source et saturnisme dans le Massif vosgien. *Revue Forestière Française* 1999 ; LI, 2 : 173-83.
9. Guérol F, Boudot JP, Jacquemin G, Vein D, Merlet D, Rouiller J. Macroinvertebrate community loss as a result of headwater stream acidification in the Vosges Mountains (N-E France). *Biodiv Conserv* 2000 ; 9 : 767-83.
10. Baudoin JM, Guérol F, Felten V, Chauvet E, Wagner P, Rousselle P. Elevated aluminium concentration in acidified headwater streams lowers aquatic hyphomycete diversity and impairs leaf litter breakdown. *Microbial Ecology* 2008 ; 56 : 60-269.
11. Dangles O, Gessner MO, Guérol F, Chauvet E. Impact of stream acidification on litter breakdown: implication for assessing ecosystem functioning. *J Appl Ecol* 2004 ; 41 : 365-78.
12. Nicolas M., Dambrine E., Ulrich E. Évolution de l'acidité et dynamique des éléments nutritifs en forêt, premiers bilans. ONF, *Rendez-vous techniques* 2008 ; hors-série n° 4 : 71-6.
13. Croisé L, Jonard M. Évolution de la nutrition des peuplements : vers une carence générale en phosphore ? ONF, *Rendez-vous techniques* ; Hors-série n° 4 : 120-6.
14. Marques R, Ranger J, Villette S, Granier A. Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands on the Beaujolais Mounts (France). 2 : Quantitative approach. *Forest Ecology and Management* 1997 ; 92 (1-3) : 167-97.
15. Fichter J, Dambrine E, Turpault MP, Ranger J. Base cation supply in spruce and beech ecosystems of the Strengbach catchment (Vosges mountains, N-E France). *Water Air Soil Pollut* 1998 ; 104 (12) : 125-48.
16. Legout A. Cycles biogéochimiques et bilans de fertilité minérale en hêtraies de plaine. Thèse de Doctorat de l'École nationale du Génie rural des Eaux et Forêts, spécialité sciences forestières. AgroParisTech, Paris 2008 : 283 p.
17. Ranger J, Allié S, Gelhaye D, Pollier B, Turpault MP, Granier A. Nutrient budgets for a rotation of a Douglas-fr plantation in the Beaujolais (France) based on a chronosequence study. *Forest Ecology and Management* 2002 ; 171 : 3-16.
18. Ranger J, Mohamed Ahamed D, Gelhaye D. Effet d'un amendement calco-magnésien associé ou non à une fertilisation, sur le cycle biogéochimique des éléments nutritifs dans une plantation d'épicéas communs (*Picea abies* Karst.) dépérissant dans les Vosges. *Ann Sci for* 1994 ; 51 : 455-75.
19. Cacot E (Coord.), Eisner N, Charnet F, Leon P, Rantien C, Ranger J. Pour la récolte raisonnée des rémanents en forêt. ADEME (Ed), Angers 2006 : 36 p.
20. Bouget C. Enjeux du bois mort pour la conservation de la biodiversité et la gestion des forêts. ONF, *Rendez-vous Techniques* 2007 ; 16 : 55-9.
21. Jonsell M, Hansson J, Wedmo L. Diversity of saproxylic beetle species in logging residues in Sweden – Comparisons between tree species and diameters. *Biological Conservation* 2007 ; 138 : 89-99.
22. Proe MF, Dutch J, Griffiths J. Harvest residue effects on micro-climate, nutrition, and early growth of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) seedlings on a restock site. *New Zealand Journal of Forest Science* 1994 ; 24 : 390-401.
23. Ecke F, Lofgren O, Sorlin D. Population dynamics of small mammals in relation to forest age and structural habitat factors in northern Sweden. *Journal of Applied Ecology* 2002 ; 39 : 781-92.
24. Du Plessis MA. 1995. The effects of fuelwood removal on the diversity of some cavity-using birds and mammals in South Africa. *Biological Conservation* 1995 ; 74 : 77-82.
25. Jabiol B, Ranger J, Richter C. Sol sensible ou résistant ? Éléments simples de diagnostic de la sensibilité à la dégradation chimique ou physique. *La Forêt Privée* 2000 ; 253 : 30-46.