



**HAL**  
open science

## **Bilan de fertilité minérale et dynamique des nutriments dans une hêtraie de faible fertilité minérale (Fougères, 35)**

Arnaud Legout, Claude Nys, Marie-Pierre M.-P. Turpault, Yannick Hamon,  
Christian Hossan, Louissette Gelhaye

### **► To cite this version:**

Arnaud Legout, Claude Nys, Marie-Pierre M.-P. Turpault, Yannick Hamon, Christian Hossan, et al..  
Bilan de fertilité minérale et dynamique des nutriments dans une hêtraie de faible fertilité minérale  
(Fougères, 35). Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2011, 33-34, pp.25-32. hal-03197751

**HAL Id: hal-03197751**

**<https://hal.science/hal-03197751>**

Submitted on 15 Jul 2024

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

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

# Bilan de fertilité minérale et dynamique des nutriments dans une hêtraie de faible fertilité minérale (Fougères, 35)

Entre effets des changements globaux et besoins croissants de bois, notamment pour l'énergie, conserver la fertilité des sols forestiers est une préoccupation fondamentale. Dans les années 90, l'INRA a installé plusieurs sites ateliers très instrumentés pour étudier notamment des forêts résineuses et des hêtraies sur sol pauvre, a priori sujettes au risque de dégradation de la fertilité. La masse des données ainsi recueillies a fourni des résultats très utiles, à l'exemple des bilans de fertilité présentés dans cet article et des recommandations qui s'ensuivent. Paradoxalement, malgré la fragilité de l'équilibre minéral révélée par les bilans, la hêtraie de Fougères paraît en bonne santé. Sans démentir le constat de vulnérabilité, cela conduit à poursuivre la recherche pour préciser les mécanismes en jeu.

## Quelques précisions sur le contexte de l'étude et les références sylvicoles

(note de la rédaction)

Le présent article expose une étude qui fait référence à la « sylviculture pratiquée » en forêt domaniale de Fougères pendant la période de relevés et mesures intensifs (1998-2004) sur le site-atelier installé par l'INRA en 1996. Cette référence est à la fois nécessaire à la compréhension des résultats, évidemment fidèle au contexte de l'étude... et obsolète aujourd'hui, ce qui nécessite un minimum d'explications pour ne pas égarer le lecteur.

### Le cadre sylvicole de la hêtraie de Fougères est aujourd'hui complètement renouvelé :

- *Guide des sylvicultures – La Hêtraie Nord-Atlantique*, établi par la direction territoriale Ile-de-France Nord-Ouest et « applicable à la partie de la direction territoriale Centre-Ouest où les conditions bioclimatiques sont similaires » (directive d'application 8500-09-DIA-TEC-002 du 8 janvier 2009) ;
- aménagement forestier révisé (2007-2021), intégrant les dispositions du guide ; l'objectif d'exploitabilité du hêtre est de 60 cm de diamètre, à l'âge moyen de 100 ans (cf. dynamique de croissance, perte de qualité des bois surannés, résistance aux aléas, etc.), avec des dispositions transitoires pour gérer l'héritage ancien.

Le renouvellement sylvicole n'est pas intervenu brutalement et il était bien amorcé dans la fin des années 90 (conduite des jeunes peuplements notamment) ; il n'en reste pas moins que :

- la durée de renouvellement fixée par l'aménagement (1981-2010) en vigueur à l'époque des relevés était de 150 ans sans distinction d'essence (hêtre et chêne sessile) ; la « révolution forestière » de la hêtraie de Fougères était donc bien de 150 ans, ce qui peut surprendre rétrospectivement ;
- le réflexe ancien de la charbonnette perdurait localement (et il a encore du mal à s'éteindre), ne laissant souvent au sol que des rémanents très fins, d'où le diamètre < 4 cm associé à la « sylviculture pratiquée sur la période d'étude ». Cependant, cela n'a aucune incidence sur la validité des bilans de fertilité minérale, qui en fait explorent plusieurs hypothèses clairement énoncées et discutées.

### Rappel géologique expliquant la « faible fertilité minérale, généralisée à l'ensemble du massif » :

La forêt de Fougères appartient au Massif Armoricaïn, la roche mère principale est la granodiorite à biotite et cordiérite, et elle est recouverte de placages de limons quaternaires, caractérisés par une granulométrie dominée par la fraction 10-50µm, l'absence de carbonate de calcium, un stock quartzueux nettement dominant, des minéraux argileux où la kaolinite et la smectite sont prépondérantes.

**D**ans les écosystèmes forestiers, le maintien de la fertilité minérale\* des sols est le fondement de la durabilité du système (Nambiar, 1996) et ce maintien passe par un équilibre des flux entrants et sortants (apports = pertes). Depuis quelques décennies, des recherches portant sur l'évolution de la fertilité minérale des écosystèmes forestiers remettent en question leur durabilité. Bonneau et Ranger (1999) ont par exemple constaté un déclin de cette fertilité dans plusieurs hêtraies françaises. Quelques études mettent également en avant l'augmentation de dépérissements chez le hêtre sur des stations à faible fertilité minérale (Nageleisen et Huart, 2005; Nageleisen et Reuter, 2007). Plus précisément, en forêt de Fougères (35), une diminution alarmante des teneurs en certains nutriments (magnésium, calcium) dans les feuilles de hêtre est constatée depuis les années 1970 (figure 1). Les teneurs foliaires étant un bon indicateur de la fertilité minérale des sols, ces observations s'interprètent comme un déclin de la fertilité minérale de la hêtraie de Fougères. Dans les écosystèmes dont la fertilité minérale est déjà faible, un tel déclin peut avoir un impact fort sur la nutrition des peuplements, entrainer une baisse de productivité suivie de dépérissements.

Le propos de cet article est de réaliser un bilan de fertilité minérale d'une hêtraie caractérisée par sa faible fertilité minérale, celle de Fougères, d'en tirer les enseignements et de fournir aux gestionnaires les recommandations qui en découlent.

## La circulation des nutriments dans les écosystèmes forestiers

Dans les écosystèmes forestiers, les nutriments circulent entre le sol et la plante : une quantité de nutriment est prélevée par l'arbre dans la solution du sol, distribuée dans la bio-

masse arborée puis une partie peut retourner au sol via des restitutions solides (chute de litière, de branches...) ou liquides (récrication\*) (figure 2). Cette boucle de circulation au sein l'écosystème présente des ouvertures vers l'extérieur (figure 2) :

■ Les apports atmosphériques : ils apportent à l'écosystème des quantités non négligeables de nutriments, sous forme de dépôts humides (contenus dans la pluie, la neige), de dépôts secs (sous forme de particules et gaz) ou de dépôts occultes (contenus dans le brouillard et les aérosols\*).

■ Les apports par altération des minéraux du sol : l'altération des minéraux du sol permet la mise à disposition de nutriments qui étaient jusque là inaccessibles pour les arbres. Les apports par altération constituent donc un gain de nutriments pour l'écosystème.

■ Les pertes par drainage : la migration des eaux dans le sol entraîne des nutriments en profondeur, sous forme soluble ou en suspension. Si l'on considère que les remontées de nutriments par capillarité sont négligeables, le flux de nutriments drainés au delà de la zone classiquement explorée par les racines (0-120 cm) est alors considéré comme une perte pour l'écosystème.

■ Les pertes liées à la récolte de biomasse : dans les écosystèmes forestiers exploités par l'homme, le prélèvement périodique de la biomasse arborée et donc de nutriments contenus dans cette biomasse constitue une perte pour l'écosystème.

## La chronoséquence, une approche permettant d'étudier l'effet de l'âge des peuplements

Les travaux réalisés dans cette étude concernent la hêtraie de la forêt domaniale de Fougères (35),

caractérisée par une faible fertilité minérale, généralisée à l'ensemble du massif. Cette hêtraie est gérée en futaie régulière.

### Le contexte sylvicole

Les conduites sylvicoles pratiquées dans les peuplements expérimentaux ont été sur la période 1998-2004 les mêmes que celles pratiquées par l'ONF sur l'ensemble de la forêt de Fougères, en respectant les règles de sylviculture préconisées dans le cahier des charges ONF-grand Ouest. Les caractéristiques des éclaircies pratiquées à Fougères sur la période 1998-2004 sont détaillées ci-dessous :

- tous les 6 ans dans les peuplements jeunes puis tous les 12 ans pour les peuplements de plus de 50 ans, la révolution étant ici de 150 ans.
- 25 % de la surface terrière du peuplement est enlevée à chaque éclaircie, les arbres étant martelés par des agents de l'ONF.

Pour les arbres martelés impliqués dans une éclaircie :

- les souches sont laissées en terre,
- les bois (troncs ou branches) d'un diamètre inférieur à 4 cm et les feuilles sont laissés sur place,
- les bois d'un diamètre supérieur à 4 cm sont exportés de la parcelle, sans écorçage préalable.

### L'approche par chronoséquence

Le traitement en futaie régulière a permis une approche par chronoséquence, qui permet de cerner toute une révolution forestière en quelques années de suivi. Cette approche consiste à étudier sur une même période des peuplements d'âges différents, pour appréhender l'effet de l'âge des peuplements sur un paramètre de l'écosystème. La chronoséquence de Fougères est composée de peuplements purs de hêtre d'âge croissant : 8 ans, 25 ans, 80 ans et 145 ans en 1996. Les peuplements ont été suivis et étudiés de façon intensive sur la période 1998-

\* Voir les définitions dans le glossaire en fin d'article, p.32

2004, grâce à des placettes expérimentales installées de façon permanente au sein des peuplements (figure 3, p.28).

### Le bilan de fertilité minérale, un indicateur de la durabilité de l'écosystème

Le bilan de fertilité minérale constitue un outil pertinent pour le diagnostic global de l'évolution d'un écosystème (Ranger et Turpault, 1999). Il prend en considération les ouvertures vers l'extérieur du cycle des nutriments (figure 2). En condition de relief modéré et en climat tempéré, le bilan de fertilité minérale d'un écosystème forestier peut s'écrire :

$$\text{BILAN} = [\text{AA} + \text{A}] - [\text{EB} + \text{Dr}]$$

Entrées      Sorties

Avec :

AA : apports atmosphériques

A : apports par altération des minéraux du sol

EB : pertes liées à l'exportation de biomasse

Dr : pertes par drainage

Le bilan de fertilité minérale est calculé sur une période donnée et l'interprétation du résultat pour un écosystème intrinsèquement pauvre est schématiquement la suivante :

■ **Un bilan positif** signifie que les quantités de nutriments entrant dans l'écosystème pendant la période étudiée sont supérieures aux quantités sortant de l'écosystème pendant cette même période : le stock de nutriment assurant la nutrition du peuplement est donc en augmentation, la fertilité n'est pas menacée et la durabilité de l'écosystème n'est pas remise en question ;

■ **Un bilan négatif** signifie que les quantités de nutriments entrant dans l'écosystème pendant la période étudiée sont inférieures aux quantités sortant de l'écosystème pendant cette même période : le stock de nutriments assurant la nu-

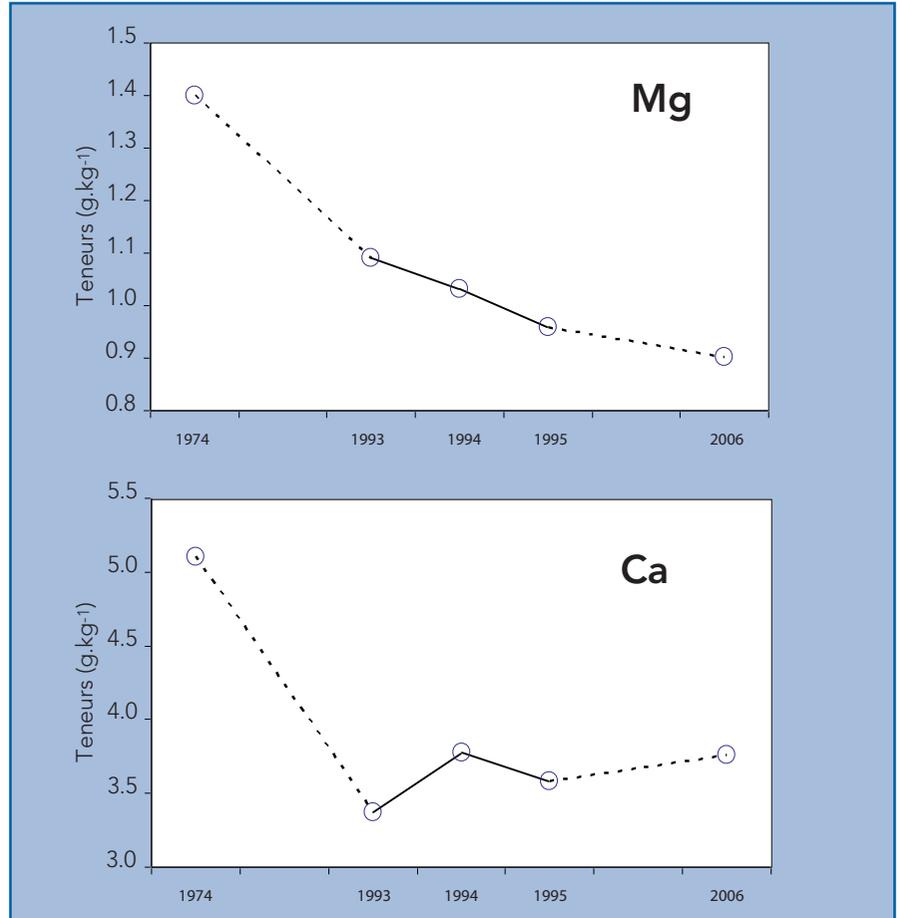


Fig. 1 : évolution sur la période 1974-2006 des teneurs foliaires en magnésium (Mg) et calcium (Ca) en Forêt de Fougères

Ces teneurs ont été mesurées par l'INRA sur un peuplement de hêtre pur âgé de 59 ans en 1974 et adjacent au peuplement de 80 ans de la chronoséquence. Les figurés en pointillés correspondent à de longues périodes sans mesures.

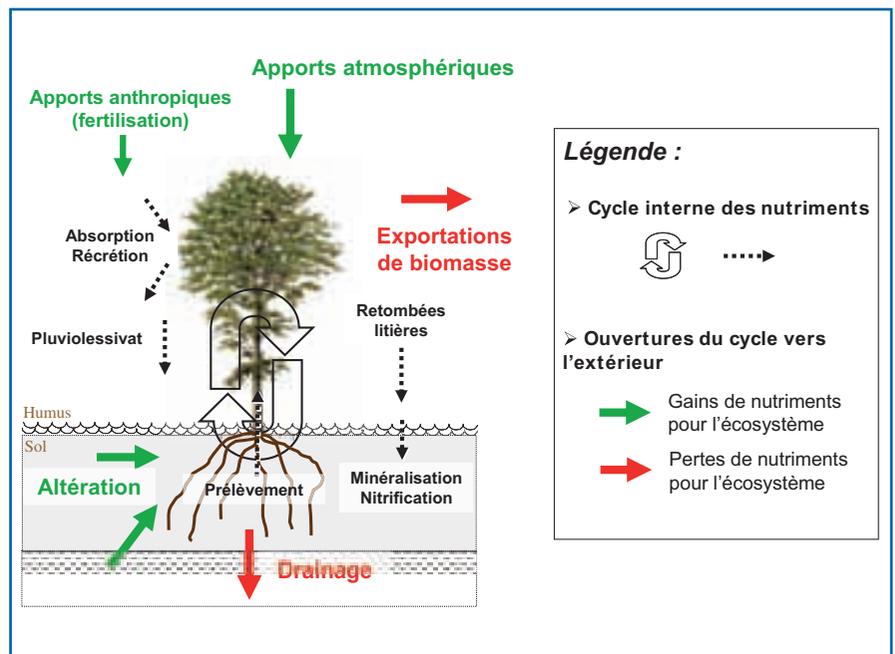


Fig. 2 : circulation des nutriments dans l'écosystème forestier : cycle simplifié des nutriments et ouvertures du cycle vers l'extérieur

trition du peuplement est donc en diminution, la fertilité est menacée et la durabilité de l'écosystème est remise en question si aucun redressement n'est envisagé.

Dans cette étude, des bilans courants sur la période 1998-2004 ont été établis pour chaque peuplement de la chronoséquence de Fougères et des bilans moyens sur la révolution (150 ans) ont été calculés. Les bilans ont été calculés pour le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K) et le phosphore (P), ces nutriments étant généralement les plus limitants pour la nutrition des peuplements dans les écosystèmes forestiers à faible fertilité minérale. Nous ne présenterons pas ici de bilan pour l'azote car cet élément n'est pas limitant à Fougères. De plus, le bilan azote n'est pas nécessaire pour expliciter la dynamique des éléments minéraux traités dans cet article (Ca, Mg, K et P). Les méthodes d'acquisition des termes du bilan sont détaillées dans le tableau 1. Trois scénarii de gestion des rémanents\* ont été envisagés pour le calcul des bilans :

- sans retour de rémanents ;
- retour au sol des rémanents d'un diamètre inférieur à 4 cm (= gestion pratiquée sur la période d'étude) ;
- retour au sol des rémanents d'un diamètre inférieur à 7 cm.

## Bilan de la sylviculture pratiquée sur la période d'étude

Pour le **phosphore, le potassium et le magnésium** (figure 4), les bilans courants et moyens pour la révolution sont positifs ou très proches de zéro. Les pertes élevées de magnésium par drainage (figure 4) dans les différents peuplements de la chronoséquence ( $> 20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ) sont compensées par les apports élevés de magnésium libéré par altération des minéraux du sol. Les apports élevés de potassium libéré par altération expliquent également les bilans positifs (ou très proches de zéro pour le peuplement de 80 ans) observés pour cet élément.

Terme du Bilan de fertilité minérale	Dispositifs ou campagnes permettant la mesure de base nécessaire au calcul des termes du bilan de fertilité	Méthodes de calcul des du bilan de fertilité minérale
<b>Apports atmosphériques</b>	Installations permanentes dans les placettes expérimentales et suivi intensif sur la période 1998-2004 (prélèvements sur le terrain tous les 28 jours) :	1) Calcul des flux hydriques de l'écosystème par modélisation (flux hydriques simulés)
<b>Pertes par drainage</b>	- Récolte et analyses chimiques de la pluie au dessus du couvert et des pluviollessivats - Récolte et analyses chimiques des solutions de sols de 0 à 120 cm de profondeur	2) Calcul du drainage d'éléments par multiplication des concentrations de nutriments mesurées sur le terrain aux flux hydriques simulés
<b>Apports par altération des minéraux du sol</b>	Mesures réalisées en plus du suivi intensif, sur la période 1998-2004, sous la forme de campagnes de terrain occasionnelles :	1) Détermination et quantification des minéraux présents dans les sols 2) Modélisation des flux de nutriments libérés par altération des minéraux du sol
<b>Pertes liées à l'exportation de biomasse</b>	- Prélèvements et analyses de sol - Inventaires, prélèvements et analyses chimiques de la biomasse arborée, en distinguant les différents « compartiments » (racines, tronc et branches à différentes découpes)	1) Inventaires forestiers 2) Mesures, échantillonnage et analyses chimiques d'arbres représentatifs du peuplement étudié 3) Création de tarifs de minéralomasse, application aux inventaires forestiers et calcul des pertes liées à l'exportation de biomasse

Tab. 1 : méthodes d'acquisition des termes du bilan de fertilité minérale. Les procédures détaillées ici ont été réalisées pour chaque peuplement de la chronoséquence (8 ans, 25 ans, 80 ans et 145 ans).

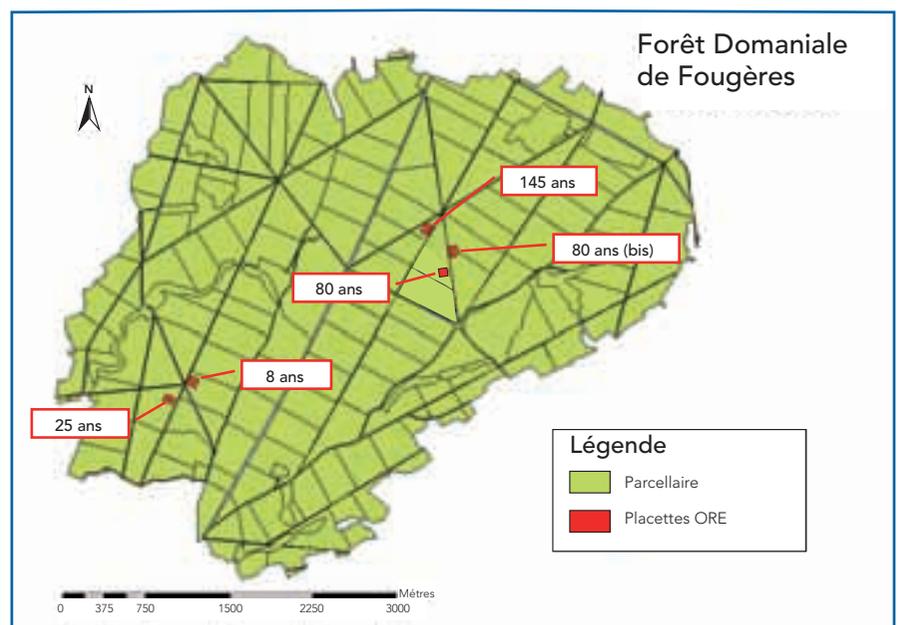


Fig. 3 : la chronoséquence de Fougères : localisation des placettes expérimentales (placettes ORE) suivies de façon intensive sur la période 1998-2004. La placette « 80 ans (bis) » a remplacé à partir de l'année 2000 la placette « 80 ans », celle-ci ayant été totalement détruite par la tempête de 1999.

Pour le **calcium** (figure 4), les bilans courants sont positifs dans les jeunes peuplements de la chronoséquence (8 ans et 25 ans) puis deviennent négatifs dans les peuplements les plus vieux (80 ans et 145 ans), et le bilan moyen est négatif. Cela vient de ce que les pertes liées à la récolte de biomasse augmentent fortement avec l'âge des peuplements (figure 4); les apports de calcium par altération étant très faibles à Fougères (~1kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>), les quantités qui entrent dans l'écosystème par les dépôts atmosphériques (~7kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>) ne compensent pas les pertes pour les vieux peuplements. Contrairement au potassium, phosphore et magnésium, le calcium est un élément très peu transloqué (voir translocation\*) dans l'arbre et qui s'accumule donc dans la biomasse arborée au fil de la révolution fores-

tière. Ainsi, les organes d'un diamètre > 4 cm qui sortent du système lors des exploitations en contiennent des quantités élevées. Cela explique les bilans calcium négatifs des vieux peuplements de la hêtraie de Fougères, alors que dans les peuplements les plus jeunes, la proportion des rémanents retournant au sol permet provisoirement des bilans positifs.

Les **bilans moyens** sur la révolution sont de +0.8 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour le phosphore, +6.1 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour le potassium, -1.6 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour le calcium et +2.9 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour le magnésium. Compte tenu de l'incertitude liée au calcul des flux et vu la forte variabilité interannuelle des apports atmosphériques et des pertes par drainage, les bilans moyens sur la révolution sont en fait très proches de l'équilibre. Ce constat illustre la fragi-

lité du système : une perturbation extérieure pourrait rapidement faire basculer les bilans actuellement positifs dans le négatif. De plus, un bilan positif n'implique pas nécessairement que la bonne nutrition minérale des peuplements soit avérée. En effet, si l'on considère d'après l'enracinement du hêtre que le prélèvement de nutriments est principalement localisé en surface des profils, les quantités élevées de magnésium et potassium libérées par l'altération en profondeur (de 80 à 120 cm essentiellement) ne profitent guère aux peuplements.

### Incidence du diamètre d'exploitation des rémanents sur le bilan de fertilité minérale

Quel que soit l'élément nutritif considéré dans cette étude, les pertes liées à l'exportation de bio-

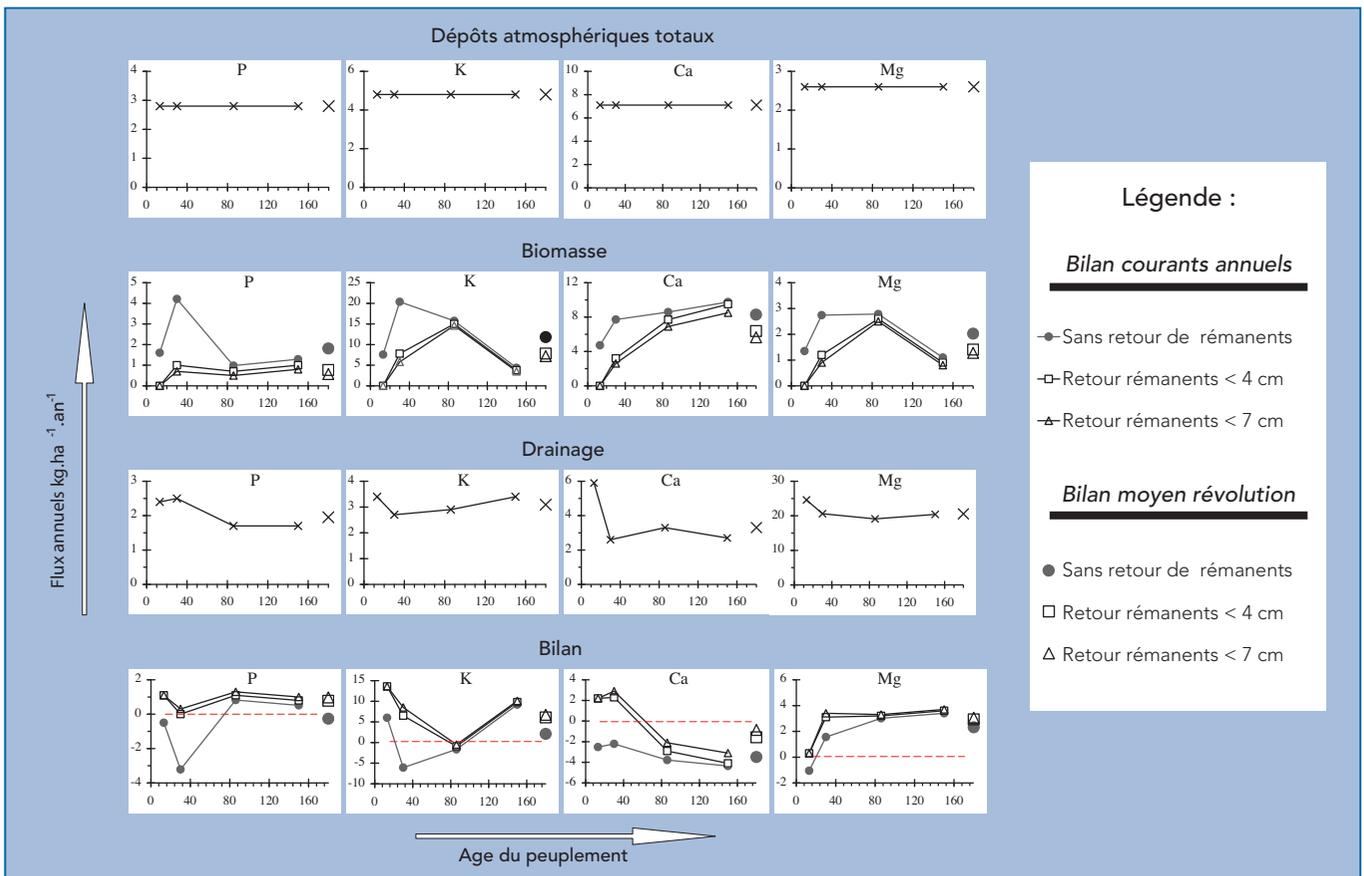


Fig. 4: bilans de fertilité minérale pour le phosphore, potassium, calcium et magnésium ; évolution des bilans courants avec l'âge des peuplements et bilans moyens sur la révolution (à droite de chaque graphique), selon trois scénarii de gestions des rémanents

Exceptée pour l'altération, l'évolution des flux impliqués dans le calcul est présentée au-dessus des bilans. Les flux qui ne sont pas influencés par les scénarii de gestion des rémanents sont représentés par le symbole « x ».(NDLR : Attention aux variations de l'échelle verticale d'un graphique à l'autre)

masse augmentent avec l'intensification simulée de l'exploitation des rémanents (figure 4). Cette intensification, selon les trois scénarios énoncés plus haut, entraîne une dégradation des bilans courants annuels et des bilans moyens sur la révolution (figure 4), et cette dégradation est plus marquée dans les jeunes peuplements de la chronoséquence de Fougères.

Les organes de l'arbre les plus riches en éléments nutritifs sont l'écorce, les feuilles ainsi que les extrémités des branches et du tronc (de diamètre <4 cm). Lorsque l'on exploite les rémanents, les organes les plus riches en éléments nutritifs sortent du système, ce qui représente une perte importante pour les écosystèmes pauvres. Dans les jeunes peuplements, les organes les plus riches en éléments nutritifs constituent une grosse part de la biomasse aérienne. C'est pourquoi, dans la phase juvénile des peuplements de Fougères, l'intensification simulée de l'exploitation des rémanents dégrade très fortement les bilans.

Ces résultats montrent donc qu'il est important de raisonner la gestion des rémanents pour pérenniser la fertilité minérale des sols dans ce type d'écosystème.

### Incidence de la durée de la révolution forestière sur le bilan de fertilité minérale

Nous avons par ailleurs envisagé l'effet d'un éventuel raccourcissement de la révolution pour la hêtraie de Fougères, selon un scénario assez tranché : les bilans de fertilité minérale estimés pour 2 révolutions successives de 75 ans, en comparaison de la révolution de 150 ans (figure 5). Pour cette estimation, nous avons considéré que la sylviculture pratiquée était similaire dans les deux cas.

Pour le phosphore, magnésium et potassium, les bilans de fertilité se

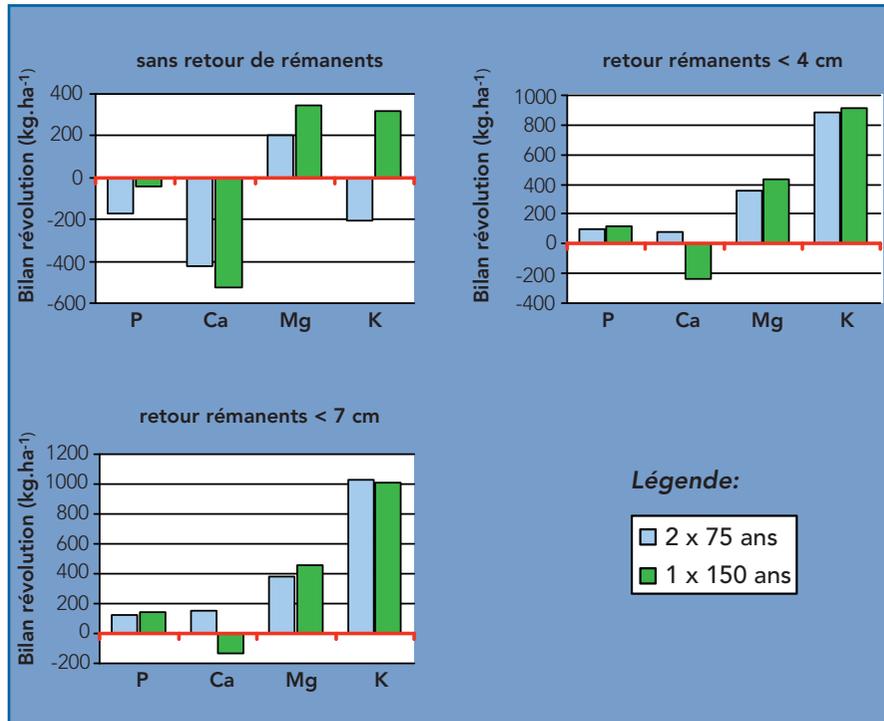


Fig. 5 : effet de la durée de la révolution forestière (2 révolutions successives de 75 ans contre 1 révolution de 150 ans) sur le bilan de fertilité minérale, et pour trois scénarii de gestion des rémanents. (NDLR : Attention aux variations de l'échelle verticale d'un graphique à l'autre)

dégradent si deux révolutions de 75 ans sont pratiquées au lieu d'une révolution de 150 ans (figure 5). Cette dégradation est très marquée lorsqu'il n'y a pas de retour de rémanents au sol. À mesure qu'un peuplement vieillit, il acquiert une certaine autosuffisance en potassium, magnésium et phosphore vis-à-vis de la ressource sol, grâce notamment au processus de translocation\* de ces éléments nutritifs dans l'arbre (voir le flux 'Biomasse', figure 4). Si la révolution forestière est raccourcie, la phase 'd'autosuffisance' est écourtée, voire inexistante et le bilan sur la révolution se dégrade donc logiquement.

Pour le calcium en revanche, la diminution de la durée de la révolution semble améliorer les bilans de fertilité de la hêtraie de Fougères, et ceci quel que soit le scénario d'exploitation des rémanents. Comme nous l'avons dit précédemment, le calcium est très peu transloqué dans l'arbre (voir le flux

'Biomasse', figure 4), ce qui pourrait expliquer ce résultat.

Malgré cette exception notable du calcium, la fertilité doit être raisonnée dans son ensemble et il faut retenir pour la gestion future de la hêtraie de Fougères que le raccourcissement de la durée de révolution entraîne globalement une baisse de la fertilité minérale de l'écosystème (en phosphore, magnésium et potassium), surtout si l'exploitation des rémanents est intense.

### Recommandations pour la gestion durable des hêtraies de faible fertilité minérale

Dans un contexte actuel de changement climatique, de réduction des dépôts atmosphériques de nutriments (suite à la réduction des pollutions) et de demande de bois énergie, la gestion sylvicole revêt une importance toute particulière dans la durabilité des écosystèmes à faible fertilité minérale. Parmi les

différents termes du bilan de fertilité minérale (*Apports atmosphériques, Apports par altération, Pertes par drainage, Pertes liées à l'exportation de biomasse*), c'est sur les pertes que le gestionnaire peut agir, les « pertes liées à l'exportation de biomasse » étant les plus modulables à court terme. Le gestionnaire peut fortement influencer le bilan de fertilité au travers des pratiques et conduites sylvicoles choisies, en jouant notamment sur l'intensité des exploitations. À la lumière de nos travaux (voir aussi Legout *et al.*, ce volume pp. 33-39) nous proposons ci-dessous quelques recommandations d'ordre général, visant au maintien de la productivité et à la pérennité de l'écosystème (le symbole ⊕ signale celles que la sylviculture appliquée à Fougères sur la période d'étude intègre déjà).

### Recommandations relatives aux coupes, pour limiter les pertes

■ Pratiquer des transitions progressives entre les révolutions forestières et préserver au maximum une couverture végétale au sol (strate herbacée, régénération bien établie) pendant ces transitions pour éviter des pertes de nutriments par drainage (Legout *et al.*, ce volume). Éviter autant que possible les coupes à blanc ⊕ qui peuvent occasionner de pertes importantes de nutriments (Ranger *et al.*, 2007, Legout *et al.*, ce volume).

■ Limiter (écorce, branches) ou proscrire (racines et feuilles ⊕) la récolte des compartiments anatomiques de l'arbre les plus riches en nutriments; cette recommandation rejoint les dispositions du guide ADEME<sup>1</sup> de récolte raisonnée des rémanents (Cacot *et al.*, 2005). Selon ce guide, les sols de la hêtraie de Fougères sont classés en 'sol très sensible à risque fort' et un amendement est conseillé en cas de récolte des rémanents.

■ Proscrire l'incinération des rémanents ⊕ les résidus de récolte bonifient le statut organique du sol (Cacot *et al.*, 2005). Leur incinération entraîne une volatilisation importante d'azote et les minéraux issus des branchages et feuillages brûlés sont concentrés sur des surfaces réduites. Ces minéraux sont généralement lixiviés rapidement, ce qui constitue une perte de nutriments pour l'écosystème.

■ Éparpiller les rémanents de coupe sur l'ensemble de la parcelle plutôt que de les entasser, afin d'éviter de concentrer les éléments nutritifs retournant au sol sur des surfaces réduites.

### Penser à l'amendement raisonné, pour un écosystème moins vulnérable

La pratique de l'amendement raisonné vise au maintien ou à la restauration de la fertilité minérale (contrairement à la fertilisation dont l'objectif est d'augmenter la productivité). La pratique de l'amendement consiste en un apport à la surface du sol de carbonate de calcium et de magnésium (généralement sous forme de roches broyées), complété si besoin de phosphore et potassium afin d'éviter des déséquilibres secondaires.

L'apport d'amendement sur des sites à très faible fertilité minérale est particulièrement bénéfique (Bonneau, 1995; Bonneau et Nys, 1997) puisqu'il restaure les sols ainsi que l'état sanitaire des arbres dans les cas de dépérissement. Les effets les plus significatifs enregistrés consécutivement à l'amendement sont les suivants (Bakker, 1998; Bonneau, 1995; Nys, 1991; Nys, 1998):

- le pH et le taux de saturation remontent, au moins dans les premiers horizons du sol;
- les réserves en éléments nutritifs du sol sont partiellement reconstituées;

- l'activité des organismes du sol est favorisée de sorte que la litière se décompose plus rapidement;
- la diversité floristique augmente, au sens où de nouvelles espèces s'installent sans bouleverser la flore initiale (aucune espèce ne disparaît);
- les arbres carencés retrouvent un état de santé et une croissance satisfaisants, généralement en moins de deux années.

À Fougères, la hêtraie ne présente pas de signe évident d'affaiblissement qui justifierait des apports d'amendement urgents et généralisés. Mais la vulnérabilité est réelle et ces apports pourraient s'envisager progressivement à l'occasion des plantations ou régénérations, les effets bénéfiques d'un amendement étant observables plus de 20 ans après l'application (Bakker, 1998).

**Arnaud LEGOUT**

UR 1138 BEF

Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers  
INRA Nancy

**Claude NYS**

UR 1138 BEF

INRA Nancy

**Marie-Pierre TURPAULT**

UR 1138 BEF

INRA Nancy

**Yannick HAMON**

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS

Sol Agro et hydrosystème

Rennes

**Christian HOSSAN**

UMR INRA-UHP 1137

Ecologie et Ecophysiologie Forestières

INRA Nancy

**Louissette GELHAYE**

UR 1138 BEF

INRA Nancy

<sup>1</sup> NDLR : Pour l'ONF, voir la note de service NDS-09-T-296 du 10 juin 2009 « Valorisation de la biomasse et protection des sols » dont les prescriptions s'appuient sur les recommandations du guide ADEME

## Glossaire

**Aérosol** : ensemble de particules, solides ou liquides, d'une substance chimique donnée en suspension dans un milieu gazeux.

**Fertilité minérale** : nous définissons ici la fertilité minérale comme la fertilité « chimique » du sol, à savoir sa capacité/potentialité à fournir les éléments minéraux (Ca, Mg, K et P) nécessaires à la croissance des peuplements.

**Récrétion** : éléments issus de l'échange d'ion entre les ions de la pluie incidente et ceux des vacuoles des cellules végétales des organes du houppier des arbres.

**Rémanents** : nous définissons ici les rémanents comme les parties du tronc et/ou des branches d'un arbre (bois + écorce, sans les feuilles) retournant au sol lors d'une exploitation forestière.

**Taux de saturation** : parmi les cations « échangeables » présents dans le sol, certains sont « acides » (comme l'aluminium ou le proton) et d'autres sont « nutritifs » (comme le calcium, le magnésium, le potassium). Le Taux de Saturation d'un sol est le pourcentage de cations nutritifs parmi l'ensemble des cations échangeables.

**Translocation** : migration des éléments nutritifs des tissus âgés des arbres vers les organes en croissance. De nombreux éléments sont concernés mais N, P et K sont les plus transloqués.

## Bibliographie

Bakker M., 1998. Effets des amendements calcaïques sur les racines fines de chêne (*Quercus petraea* et *robur*) : conséquences des changements dans la rhizosphère. Thèse, Nancy I, Nancy, 287 p.

Bonneau M., 1995. Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. ENGREF, Nancy, 367 p.

Bonneau M., Nys C., 1997. Effets des amendements calci-magnésiques en forêt. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France, n°83 pp. 161-169

Bonneau M., Ranger J., 1999. Evolution de la fertilité chimique des sols forestiers. Recommandations pour une gestion durable. La forêt privée n° 247 pp. 51-64

Cacot E., Eisner N., Charnet F., Leon P., Rantien C., Ranger J., 2005. La récolte raisonnée des rémanents en forêt. ADEME Editions, Angers, 35 p.

Nageleisen L.-M., Huart O., 2005. Problèmes sanitaires d'actualité en

hêtraie : la maladie du hêtre dans les Ardennes. Revue Forestière Française, vol. LVII n° 2 pp. 249-254

Nageleisen L.-M., Reuter J.-C., 2007. Dépérissements de hêtre : retour sur les situations de crise de la hêtraie au cours de la dernière décennie. Bilan de la santé des forêts en 2006, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Département de la Santé des Forêts, Antenne de Nancy.

Nambiar E.K.S., 1996. Sustained productivity of forests is a continuing challenge to soil science. Soil Science Society of America Journal, vol. 60 n° 6 pp. 1629-1642

Nys C., 1991. Intérêt des amendements pour la production et la santé de l'épicéa commun en condition de sol acide. La forêt privée n° 201 pp. 30-38

Nys C., 1998. Gestion durable de la fertilité de l'écosystème hêtraie acidiphile de basse altitude. Rapport scientifique, GIP ECOFOR.

Ranger J., Loyer S., Gelhaye D., Pollier B., Bonnaud P., 2007. Effects

of clear-cutting of Douglas-fir plantation (*Pseudotsuga menziesii* F.) on the chemical composition of soil solutions and on the leaching of DOC and ions in drainage waters. Annals of Forest Science, n° 64 pp. 183-200

Ranger J., Turpault, M.P., 1999. Input-output nutrient budgets as a diagnostic-tool for the sustainability of forest management. Forest Ecology and Management n° 122 pp. 7-16