



HAL
open science

Amendements calco-magnésiens et fonctionnement écologique : bilan des expériences conduites dans l'Est de la France (massif vosgien et Ardennes)

Jean-Pierre Renaud, Jean-François Picard, Claudine Richter, Arnaud Legout,
Claude Nys

► To cite this version:

Jean-Pierre Renaud, Jean-François Picard, Claudine Richter, Arnaud Legout, Claude Nys. Amendements calco-magnésiens et fonctionnement écologique : bilan des expériences conduites dans l'Est de la France (massif vosgien et Ardennes). *Revue forestière française*, 2009, 61 (3), pp. 283-300. 10.4267/2042/30103 . hal-03197777

HAL Id: hal-03197777

<https://hal.inrae.fr/hal-03197777v1>

Submitted on 25 Nov 2021

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

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

AMENDEMENTS CALCO-MAGNÉSIENS ET FONCTIONNEMENT ÉCOLOGIQUE : BILAN DES EXPÉRIENCES CONDUITES DANS L'EST DE LA FRANCE (MASSIF VOSGIEN ET ARDENNES)

JEAN-PIERRE RENAUD – JEAN-FRANÇOIS PICARD – CLAUDINE RICHTER
ARNAUD LEGOUT – CLAUDE NYS

Au cours du siècle dernier, les teneurs atmosphériques en oxydes de soufre et d'azote ont fortement augmenté. Ceci a conduit à une acidification de nombreux écosystèmes terrestres et aquatiques, bien mise en évidence par de nombreux travaux de recherche.

Les mesures réglementaires prises depuis une vingtaine d'années ont permis de réduire les émissions (de 33 % pour les nitrates et 85 % pour le soufre) bien que la concentration de certains polluants comme l'ammoniac, dont une part importante des émissions est liée à l'agriculture, soit demeurée stable (CITEPA, 2003). Les forêts sont donc toujours "fertilisées" en azote (Ulrich *et al.*, 2007), ce qui a des conséquences sur le rythme de croissance des arbres, la composition floristique, voire la faune et l'eau (Dupouey *et al.*, 1998 ; Cluzeau *et al.*, 2001 ; Bontemps, 2006). Ce phénomène constitue une préoccupation scientifique majeure.

Sur les sols pauvres, à faible pouvoir tampon, cette fertilisation azotée est à l'origine de processus chimiques contribuant, avec les dépôts atmosphériques acides, à l'acidification des sols. Au niveau des écosystèmes forestiers, ce double phénomène peut induire des désordres nutritionnels liés à une modification du cortège mycorhizien, une diminution de la croissance racinaire (Bakker, 1999b ; Bakker et Nys, 1999 ; Bakker *et al.*, 2000) et à une altération de l'état sanitaire de la forêt.

La restauration naturelle du fonctionnement des écosystèmes forestiers ne s'envisage donc qu'à long terme, sous réserve d'une réduction soutenue des émissions de polluants. Ainsi, les exportations des minéraux, qu'elles soient liées à une perte par lessivage provoquée par les dépôts acides, ou à une augmentation du rythme des récoltes attribuable à une accélération de la croissance des peuplements, font partie des paramètres essentiels à prendre en compte pour gérer durablement les écosystèmes (Nys, 1998 ; Legout, 2008).

Afin de revitaliser les forêts dépérissantes, des essais de restauration, par amendement calco-magnésien, ont été mis en œuvre entre 1981 et 1992 dans le massif vosgien et en Ardenne primaire, régions particulièrement exposées au processus d'acidification. Ce travail fait le bilan de ces expérimentations réalisées par l'INRA (Nancy) et l'ONF. Il présente les effets à moyen terme de ces apports sur le fonctionnement et la dynamique de l'écosystème forestier.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sites et traitements

Les forêts du massif vosgien et des Ardennes couvrent une superficie de 540 000 ha dont 41 % est constitué d'Épicéa commun (*Picea abies* : 22 %) et de Sapin pectiné (*Abies alba* : 19 %). Le dispositif expérimental comporte 22 sites pour lesquels la température moyenne annuelle varie entre 6 et 8 °C, les précipitations entre 1 100 et 1 650 mm/an et l'altitude entre 410 et 1 050 m. Le tableau I (pp. 286-287) présente les sites et les traitements appliqués.

Des peuplements équiennes d'Épicéa ou de Sapin âgés de 30 à 120 ans ont été sélectionnés. Tous présentaient des symptômes de dépérissement sauf celui de Rouffach (site 22). Ces peuplements sont situés sur des sols bruns acides à podzoliques, et possèdent des humus variant du mull acide au dysmoder. La texture des sols varie de sableuse à limono-sableuse. Les roches mères, généralement pauvres, ont été regroupées en 3 classes, sur la base de leurs concentrations en oxydes de calcium et de magnésium (Perriaux, 1961 ; Souchier, 1971).

Les traitements ont été appliqués par couple (amendé – témoin) de placettes en situation de peuplement et de station comparable, et à raison de 1 à 3 répétitions par site. L'amendement y a été appliqué à la main sur des surfaces de 0,25 ha dans les dispositifs "INRA", par hélicoptère ou par soufflerie pour les parcelles "ONF" (environ 10 ha). La dose du traitement appliqué varie d'un site à l'autre, avec en moyenne une application de 2,5 tonnes de carbonate de calcium et d'oxyde de magnésium ou de dolomie. Les traitements ont été appliqués en une seule fois, entre 1981 et 1992, selon les sites.

MÉTHODES ET ANALYSES

Une campagne de mesures a été réalisée sur l'ensemble des sites en automne-hiver 1998-1999.

Mesures pédologiques

- *L'humus (horizons holorganiques)*

Dans les témoins, les humus varient du type mull acide au dysmoder. Ils ont été récoltés en mai 1999 à raison de 5 prélèvements d'un cadrat de 0,1 m² par placette. Les échantillons ont été séchés à 65 °C et pesés. Les échantillons ont été regroupés et broyés avant analyses.

- *Le sol*

Les profondeurs 0-5 cm, 5-20 cm, 20-35 cm et 35-50 cm ont été échantillonnées d'octobre 1998 à mars 1999. Dix prélèvements aléatoires par placette ont été réalisés à l'aide de cylindres métalliques (diamètre de 6,3 ou 8 cm). Dans les sols très caillouteux, 5 échantillons ont été prélevés à la tarière.

La densité apparente de la terre fine a été calculée, après séchage à 105 °C. Les analyses chimiques sur la terre fine (< 2 mm) d'un échantillon composite pour chaque placette ont été effectuées par le laboratoire d'analyse des sols de l'INRA à Arras ; pH_{eau} et pH_{KCl} sont mesurés dans de l'eau déminéralisée et dans une solution saline (KCl) à 1 mole/litre. La teneur en carbone organique et en azote total est déterminée par combustion à haute température (CHN). Le phosphore assimilable (P₂O₅) est déterminé selon la méthode Duchaufour. Les cations Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Na⁺, K⁺, Mn⁺⁺, H⁺ et Al⁺⁺⁺ sont extraits dans une solution de chlorure d'ammonium (NH₄Cl) à 1 mole/litre, au pH du sol. Ils sont dosés par ICP (*Inductively Couple Plasma*), sauf pour H⁺ qui

est déterminé par titration. La capacité effective d'échange cationique (ECEC) est estimée égale à la somme de tous les cations échangeables (Mg^{++} , Ca^{++} , Na^+ , K^+ , Mn^{++} , H^+ et Al^{+++}) et l'acidité d'échange est la somme des teneurs en cations acidifiants (H^+ et Al^{+++}). Le taux de saturation en bases (S/T) représente le rapport de la somme des cations "nutritifs" (Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Mn^{++}) avec la ECEC.

- *Estimation des réserves en éléments nutritifs du sol (mesures quantitatives)*

Les réserves sont estimées, horizon par horizon, à partir des valeurs moyennes des concentrations en C, N, P_2O_5 , K_2O , CaO, MgO et des moyennes de densité apparente mesurée ou estimée par modélisation (Dupouey *et al.*, 1999).

Observations de l'état sanitaire des arbres

L'état de santé des arbres est noté en fonction du degré de déficit foliaire des houppiers et de leur coloration anormale (jaunissement) selon les protocoles du réseau européen de surveillance de l'état sanitaire des forêts (DSF, 1997). Ces notations ont été réalisées sur un minimum de 10 arbres par placette, choisis parmi les dominants. Elles ont été effectuées en été avec des périodicités irrégulières selon les sites, de 0 à 10 ans après le traitement.

Analyses foliaires

L'analyse foliaire en éléments minéraux est un indice de la qualité de la nutrition des arbres, c'est un outil pratique pour détecter d'éventuelles carences. Dans cette étude, les normes utilisées concernent les résineux et ont été adaptées de différents travaux (Bonneau, 1995 ; Nys, 1998). Le niveau critique correspond à la concentration en élément pour laquelle un apport extérieur conduit à une stimulation de la croissance. Le seuil de carence correspond à la concentration pour laquelle l'arbre montre des symptômes visibles de déficience.

Les aiguilles de l'année courante (n) et de l'année antérieure (n - 1) ont été prélevées à l'automne 1998, sur chacune des placettes étudiées. Le rapport des teneurs entre les années (n : n - 1) est un indice de la mobilisation et du transfert interne des éléments.

La récolte a été effectuée selon le protocole du réseau RENECOFOR (Croisé *et al.*, 1999), dans le tiers supérieur du houppier, à raison de 8 arbres par placette. Les aiguilles ont été séparées par année, séchées et broyées. Un échantillon composite par placette a été analysé au moyen d'une torche au plasma (ICP), après minéralisation par voie humide.

Mesures de la croissance des arbres

Des caractéristiques dendrométriques de 2 170 épicéas et 554 sapins ont été relevées. Très peu d'interventions (par exemple éclaircies) ont été effectuées dans ces dispositifs. Ce facteur a donc été considéré comme négligeable lors des analyses. La circonférence à 1,30 m du sol (C_{130}), d'un minimum de 15 arbres (en moyenne 25 arbres) par placette, a été mesurée dès la mise en place du dispositif (T_0), en période hivernale, puis à différentes dates après traitement (T_i). L'accroissement relatif cumulé en surface terrière (dG/G_0) a été calculé pour chaque arbre.

TABLEAU I **Caractéristiques des sites et traitements appliqués**

| | Site | Altitude (m) | Température (°C) | Précipitations (mm) | Peuplement | | Roche mère | |
|----------------------|------|--------------|------------------|---------------------|------------|-----|------------------------|---------------|
| | | | | | Essence* | Âge | Type | Classe |
| La Croix-Scaille**** | 1 | 410 | 7 | 1 101 | Pa | 60 | Schiste | très pauvre |
| La Croix-Scaille | 2 | 410 | 7 | 1 101 | Pa | 60 | Schiste | très pauvre |
| La Croix-Scaille | 3 | 410 | 7 | 1 101 | Pa | 30 | Schiste | très pauvre |
| La Croix-Scaille | 4 | 410 | 7 | 1 101 | Pa | 30 | Schiste | très pauvre |
| Remiremont | 5 | 600 | 8 | 1 653 | Aa | 100 | Grès vosgien | très pauvre |
| Humont | 7 | 760 | 8 | 1 562 | Aa ; Pa | 35 | Grès vosgien | très pauvre |
| Donon | 9 | 570 | 8 | 1 615 | Pa | 75 | Grès vosgien | très pauvre |
| Grendelbruch | 10 | 770 | 8 | 1 617 | Aa | 103 | Granite du Kagenfels | très pauvre |
| Grossmann | 12 | 780 | 8 | 1 591 | Pa | 75 | Grès vosgien | très pauvre |
| Mortagne | 17 | 820 | . | . | Aa | 120 | Grès vosgien | très pauvre |
| Grand Fossard | 6 | 625 | . | . | Aa ; Pa | 60 | Leptinite | pauvre |
| Hospices | 13 | 840 | . | . | Pa | 35 | Granite du Valtin | pauvre |
| Fraize | 14 | 750 | . | . | Aa | 115 | Granite du Valtin | pauvre |
| Bonhomme | 15 | 945 | 6 | 1 550 | Pa | 60 | Granite du Valtin | pauvre |
| Vologne | 16 | 950 | 6 | 1 560 | Aa | 105 | Grès permien | pauvre |
| Louchbach | 18 | 835 | 7 | 1 535 | Pa | 75 | Granite du Valtin | pauvre |
| Bonhomme | 19 | 585 | 8 | 1 224 | Pa | 50 | Granite du Valtin | pauvre |
| Vagney | 8 | 1 050 | 6 | 1 593 | Aa | 70 | Granite de Remiremont | intermédiaire |
| Russ | 11 | 1 045 | 6 | 1 589 | Aa | 104 | Granite de Waldersbach | intermédiaire |
| Aumontzey | 20 | 670 | 8 | 1 331 | Pa | 30 | Mignatite de Gerbepal | intermédiaire |
| Grange | 21 | 710 | 8 | 1 392 | Pa | 30 | Mignatite de Gerbepal | intermédiaire |
| Rouffach | 22 | 835 | . | . | Aa | 90 | Granite à biotite | intermédiaire |

* Aa : *Abies alba* (Sapin pectiné) ; Pa : *Picea abies* (Épicéa commun).

** Types de sol : BA = brun acide ; BO = brun ocreux ; O = ocre ; OP : ocre podzolique ; RC = Ranker cryptopodzolique.

*** Textures : (SA, SL) = sableuse ; (LAS, LS, LSA) = limono-sableuse ; LL = limoneuse.

**** Nombre de répétition des traitements par site.

***** A la Croix-Scaille (site 1 à 4), un traitement supplémentaire (Ca uniquement) a été effectué à raison de 1 400 kg/ha de CaO.

| | Humus | Sol** | Texture*** 0-5 cm | Traitements | | | |
|----------------------------|------------|-------|----------------------|-------------|---------|-------------|-------------|
| | | | | Année | REP**** | CaO (kg/ha) | MgO (kg/ha) |
| La Croix-Scaille***** | Moder | BA | LL | 81 | 2 | 1 170 | 295 |
| La Croix-Scaille | Moder | BA | LL | 90 | 2 | 1 170 | 295 |
| La Croix-Scaille | Moder | BA | LAS | 92 | 2 | 1 170 | 295 |
| La Croix-Scaille | Moder | BA | LAS | 92 | 2 | 1 170 | 295 |
| Remiremont | Mull | BA | LAS | 85 | 3 | 1 170 | 295 |
| Humont | Mull moder | BA | SA | 91 | 2 | 757 | 380 |
| Donon | Mull acide | BA | SL | 91 | 2 | 631 | 317 |
| Grendelbruch | Mull acide | BA | SL | 85 | 2 | 1 170 | 295 |
| Grossmann | Moder | RC | SL | 85 | 2 | 1 170 | 295 |
| Mortagne | Moder | O | SA | 85 | 2 | 1 170 | 295 |
| Grand Fossard | Mull moder | BO | SA | 91 | 2 | 757 | 380 |
| Hospices | Mull moder | BO | SA | 91 | 3 | 716 | 360 |
| Fraize | Mull acide | OP | SA | 91 | 3 | 631 | 317 |
| Bonhomme | Moder | OP | LSA | 91 | 2 | 631 | 317 |
| Vologne | Moder | BA | LSA | 85 | 2 | 1 170 | 295 |
| Louchbach | Moder | BA | SA | 85 | 1 | 1 170 | 295 |
| Bonhomme | Moder | OP | LSA | 91 | 3 | 1 170 | 295 |
| Vagney | Mull | BA | SA | 91 | 2 | 757 | 380 |
| Russ | Mull | BA | LSA | 85 | 2 | 1 170 | 295 |
| Aumontzey | Mull moder | BA | SA | 89 | 1 | 700 | 375 |
| Grange | Mull moder | BA | LSA | 89 | 1 | 700 | 375 |
| Rouffach | Moder | BA | SL | 85 | 1 | 1 170 | 295 |

* Aa : *Abies alba* (Sapin pectiné) ; Pa : *Picea abies* (Épicéa commun).
 ** Types de sol : BA = brun acide ; BO = brun ocreux ; O = ocre ; OP : ocre podzolique ; RC = Ranker cryptopodzolique.
 *** Textures : (SA, SL) = sableuse ; (LAS, LS, LSA) = limono-sableuse ; LL = limoneuse.
 **** Nombre de répétition des traitements par site.
 ***** A la Croix-Scaille (site 1 à 4), un traitement supplémentaire (Ca uniquement) a été effectué à raison de 1 400 kg/ha de CaO.

RÉSULTATS

Effets sur les sols

Un des premiers effets de l'amendement s'observe au niveau de l'humus. Tous sites confondus, il favorise une diminution de la quantité de matière sèche et un accroissement des valeurs de pH (tableau II, ci-dessous). Il est à noter que les pessières présentent une quantité de matière sèche plus élevée et des valeurs de pH inférieures (c'est-à-dire plus d'acidité) par rapport aux sapinières.

TABLEAU II Effet moyen de l'amendement sur la matière sèche et le pH de l'humus (effet significatif à un seuil inférieur à 0,001)

| Espèce | Traitement | Matière sèche (tonne/ha) | pH _{eau} | pH _{KCl} |
|--------------|------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Épicéa | Témoin | 33 | 3,7 | 2,9 |
| | Amendé | 20 | 4,2 | 3,5 |
| Sapin | Témoin | 13 | 4,1 | 3,3 |
| | Amendé | 8 | 4,5 | 3,9 |

FIGURE 1 EFFETS MOYENS DE L'AMENDEMENT SUR LE PH_{EAU} (partie du haut) ET LE TAUX DE SATURATION EN BASES (partie du bas) POUR LES PEUPELEMENTS D'ÉPICÉA (à gauche) ET DE SAPIN (à droite). Les barres horizontales représentent l'erreur standard

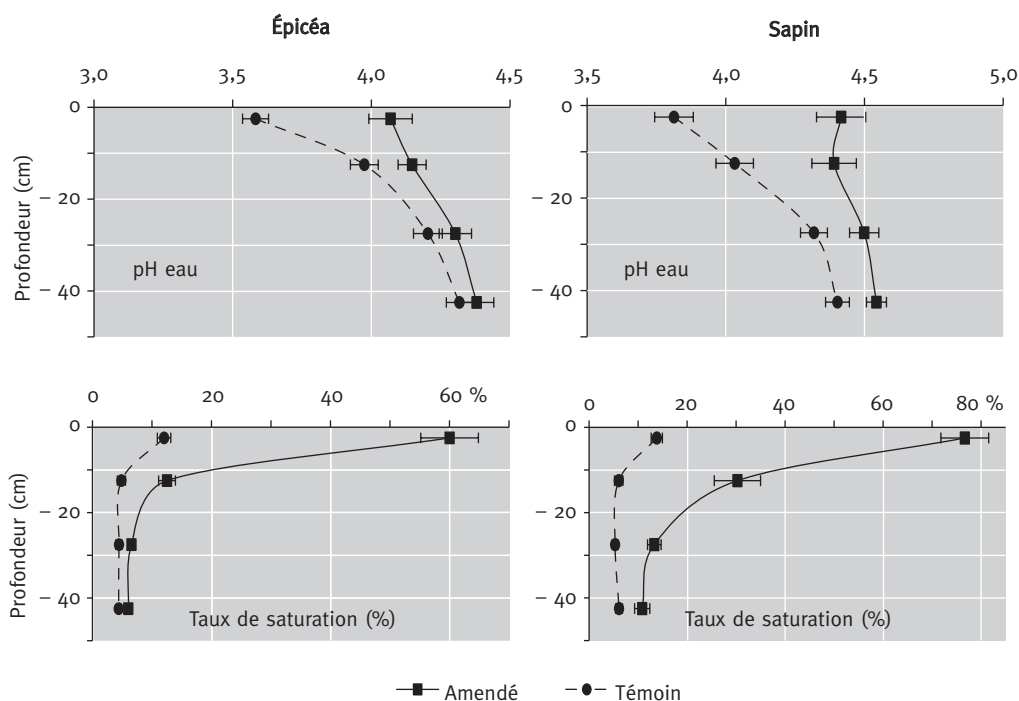
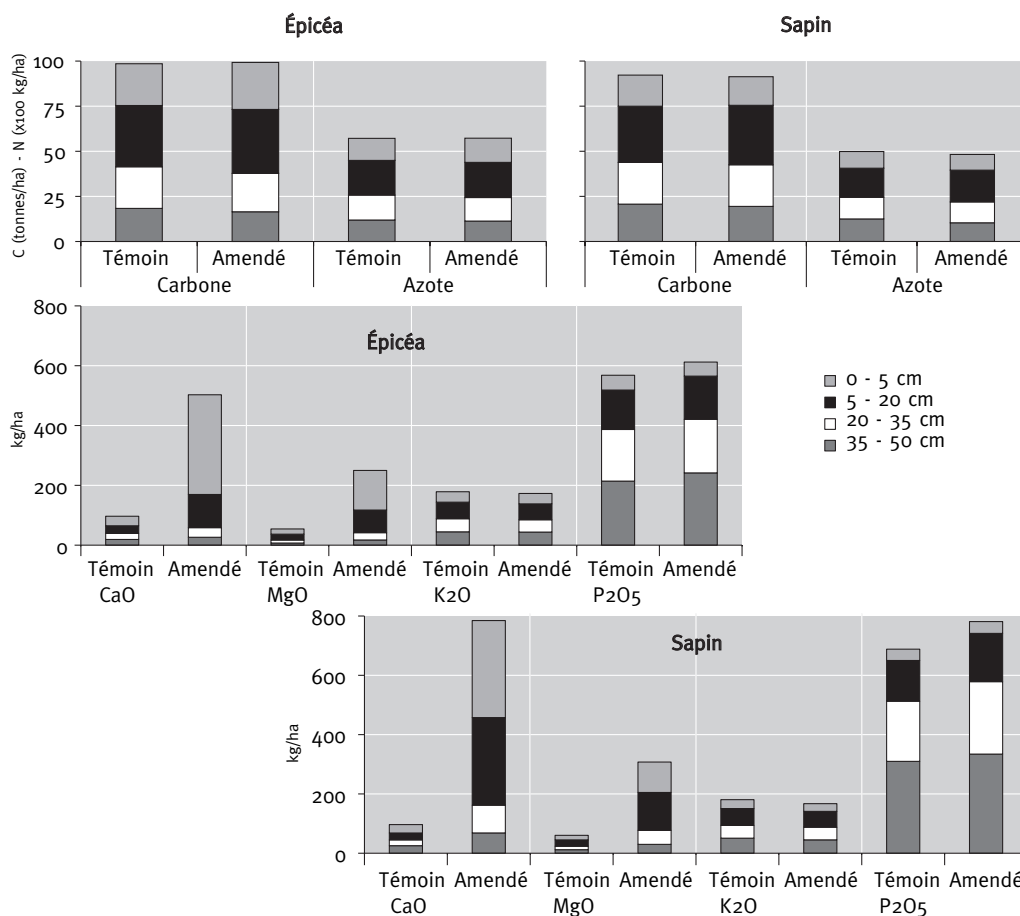


FIGURE 2

EFFETS MOYENS DE L'AMENDEMENT
SUR LES STOCKS TOTAUX DE CARBONE ET D'AZOTE,
AINSI QUE SUR LES STOCKS (exprimés en oxydes) DE CALCIUM, MAGNÉSIUM,
POTASSIUM ET PHOSPHORE POUR LES PEUPLMENTS D'ÉPICÉA (à gauche) ET DE SAPIN (à droite).



Au niveau du sol minéral, la figure 1 (p. 288) résume les principaux effets de l'amendement sur le pH et le taux de saturation en bases (S/T). Une augmentation significative des valeurs de pH et de S/T est observée en profondeur, jusqu'à 30 cm sous pessière (figure 1, à gauche) et 50 cm sous sapinière (figure 1, à droite).

Les effets de l'amendement sur les réserves d'éléments nutritifs et de carbone du sol minéral sont illustrés par la figure 2 (ci-dessus). Les seuils de fertilité pour les différents éléments (Bonneau, 1995 ; Nys, 1998 ; Augusto, 1999) sont également indiqués.

L'amendement a peu d'effet sur les stocks de carbone et d'azote. Pour les peuplements d'Épicéa, ils sont respectivement de 99 et 6 tonnes/ha et légèrement moindres pour les sapinières (92 et 5 tonnes/ha). L'amendement n'affecte pas non plus les stocks moyens de K₂O et de P₂O₅. Pour les 2 types de peuplements, les stocks de K₂O restent faibles, sous le seuil considéré comme critique de 250 kg/ha. Par contre, les stocks de P₂O₅ sont représentatifs de sols riches en phosphore (> 500 kg/ha).

L'amendement a un effet marqué sur les stocks de CaO et de MgO. Pour ces deux éléments, les peuplements témoins possèdent des stocks largement inférieurs aux seuils considérés comme critiques, respectivement de 350 et 150 kg/ha. Sous l'action de l'amendement, les stocks de CaO initialement inférieurs à 100 kg/ha sont passés à 503 kg/ha pour les pessières et 785 kg/ha pour les sapinières. L'amendement a donc permis de largement dépasser le seuil considéré critique pour le CaO. Une situation similaire s'observe pour le MgO. Les stocks de l'ordre de 60 kg/ha pour les peuplements témoins passent à 250 et 308 kg/ha respectivement pour les pessières et sapinières. La majeure partie de ces stocks est localisée dans les horizons superficiels, mais une augmentation s'observe également dans les horizons profonds.

Comparé aux apports initiaux en CaO et MgO, qui étaient respectivement de l'ordre de 960 et 325 kg/ha, les stocks présents dans les peuplements amendés représentent une forte proportion de ces apports.

Cette augmentation des stocks de CaO et MgO contribue donc à améliorer la fertilité des sols, qui restent très désaturés pour les peuplements témoins, avec des valeurs de S/T inférieures à 20 % (figure 1, p. 288).

Effets sur les arbres

- *État sanitaire*

Rapidement après l'amendement, le déficit foliaire des placettes amendées a été réduit et cet effet semble durable. Pour un même site, l'amélioration du déficit foliaire (différence entre placette amendée et témoin pour l'année 1998) est exprimée en fonction des valeurs moyennes des témoins (figure 3, à gauche). La même opération a été faite pour la coloration anormale (figure 3, à droite). Si l'on considère un intervalle de confiance arbitraire de ± 5 % de chaque côté de l'ordonnée de valeur zéro (pas de différence entre amendé et témoin), on observe que l'amendement a contribué à améliorer les conditions tant de déficit foliaire que de coloration anormale. Évidemment, le degré d'amélioration est lié au degré de détérioration initiale des houppiers. Cette propriété intrinsèque des données conduit à une limite diagonale que l'on observe sur les graphiques de la figure 3 (p. 291). On note que l'amplitude des améliorations est plus réduite pour les sapinières que pour les pessières.

- *Croissance*

L'évaluation de l'effet de l'amendement sur la croissance des arbres a été réalisée à partir de mesures de circonférence. De façon à rendre ces données plus homogènes, et faciliter leur analyse, l'accroissement en surface terrière de chaque arbre a été exprimé en fonction de sa surface terrière initiale et les moyennes par placette ont été analysées.

La figure 4 (p. 291) illustre la relation entre l'accroissement relatif moyen en surface terrière dans les placettes amendées et dans les placettes témoins. On constate une légère stimulation de la croissance pour l'Épicéa, et un effet plutôt neutre pour le Sapin. Une assez grande variabilité est également constatée entre les sites.

- *Nutrition des peuplements*

Sur la base des normes de composition foliaire, on observe des concentrations en N, S, P et K se situant dans des zones critiques de nutrition (tableau III, p. 292). Les concentrations en S et P, tant pour les épicéas que pour les sapins, et en Ca pour les placettes témoins d'Épicéa, se situent même sous le seuil de carence. Pour les épicéas, les concentrations de Mg et Mn sont également basses.

FIGURE 3

AMÉLIORATION DU DÉFICIT FOLIAIRE (à gauche)
ET DE LA COLORATION ANORMALE (à droite),
EXPRIMÉE EN FONCTION DE LA VALEUR DES TÉMOINS, POUR L'ANNÉE 1998

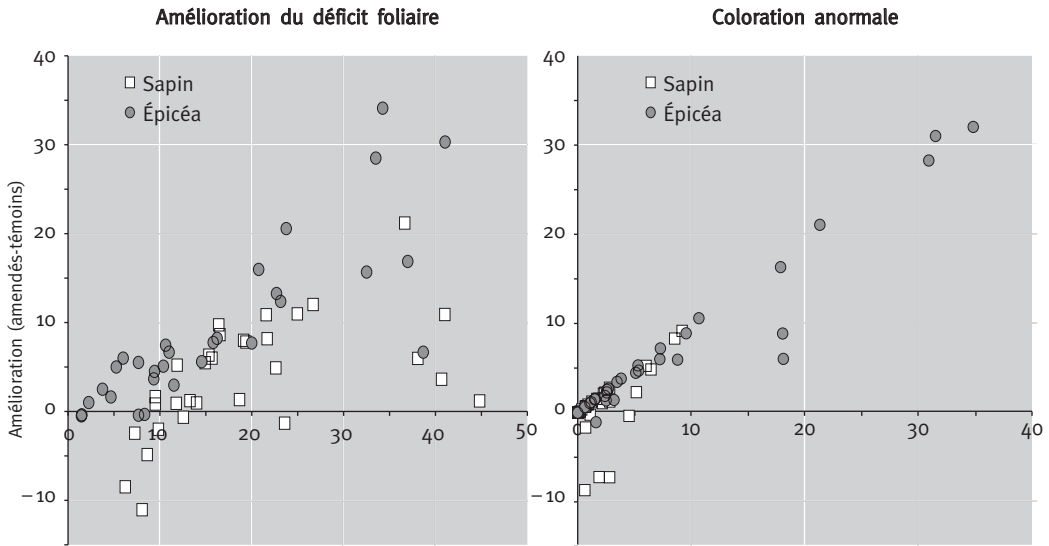


FIGURE 4

ACCROISSEMENT RELATIF MOYEN EN SURFACE TERRIÈRE DES PLACETTES AMENDÉES
(% de la surface terrière initiale)
EN FONCTION DES PLACETTES TÉMOINS
POUR LES ÉPICÉAS ET SAPINS

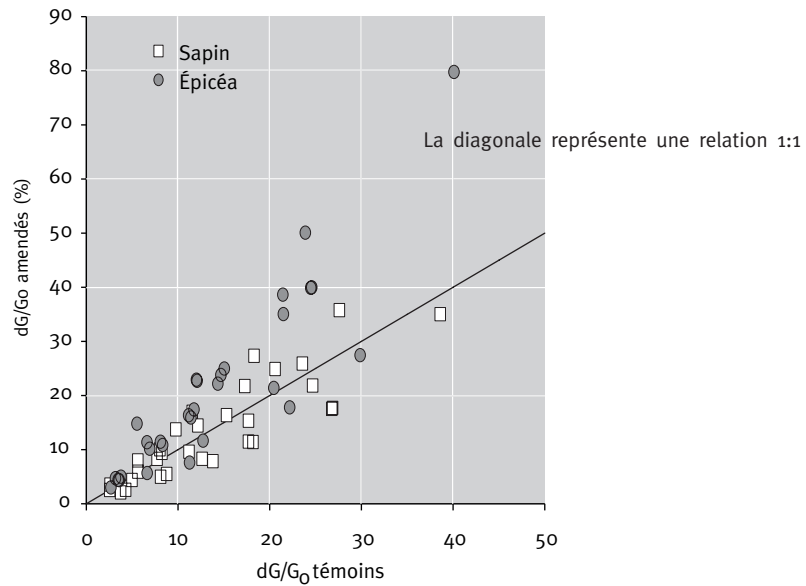


TABLEAU III **Effet de l'amendement sur les concentrations en éléments nutritifs des aiguilles de l'année courante (partie du haut), et sur le rapport entre les concentrations en éléments nutritifs des aiguilles de l'année courante sur celles des aiguilles de l'année antérieure (partie du bas)**

| Espèce | Traitement | N | S | P | K | Ca | Mg | Mn | Cu | Zn |
|--------|------------------|-------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| | | | | | | | | | | |
| Normes | Niveau critique | 15,0 | 1,20 | 1,80 | 6,0 | 3,5 | 1,00 | 1,00 | 1,5 | < 20 |
| | Seuil de carence | 10,0 | 1,00 | 1,50 | 4,0 | 2,5 | 0,60 | 0,20 | 2,5 | |
| Épicéa | Témoin | 12,7 | 0,75 | 1,21 | 5,3 | 1,8 | 0,61 | 0,48 | 3,5 | 17 |
| | Amendé | 12,5 | 0,77 | 1,23 | 4,5 | 2,9 | 0,96 | 0,48 | 3,2 | 24 |
| Sapin | Témoin | 11,49 | 0,87 | 1,19 | 5,94 | 3,72 | 1,02 | 1,19 | 3,9 | 30 |
| | Amendé | 11,18 | 0,89 | 1,16 | 4,73 | 5,43 | 1,65 | 0,96 | 4,2 | 31 |

N.B. Les valeurs soulignées indiquent un effet significatif de l'amendement. Les valeurs en grisé sont en dessous des teneurs optimales.

| Espèce | Traitement | RN | RS | RP | RK | RCa | RMg | RMn | RCu | RZn |
|--------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | | | |
| Épicéa | Témoin | 1,03 | 0,96 | 1,26 | 1,19 | 0,77 | 1,47 | 0,88 | 2,36 | 1,55 |
| | Amendé | 1,03 | 0,96 | 1,23 | 1,13 | 0,67 | 1,07 | 0,75 | 1,03 | 1,22 |
| Sapin | Témoin | 0,95 | 0,90 | 1,24 | 1,33 | 0,89 | 1,40 | 0,92 | 2,30 | 1,07 |
| | Amendé | 0,93 | 0,86 | 1,19 | 1,29 | 0,83 | 1,06 | 0,80 | 1,61 | 0,94 |

N.B. Les valeurs soulignées indiquent un effet significatif de l'amendement.

L'amendement a permis d'accroître les concentrations foliaires en Ca et en Mg pour les deux essences, et en Zn pour les épicéas seulement. Par contre, il a provoqué une diminution des concentrations en K tant pour l'Épicéa que pour le Sapin. Les concentrations en K qui étaient déjà dans la zone critique pour les placettes témoins (5,3-5,9 g/kg) s'approchent donc du seuil de carence suite à l'amendement (4,5-4,7 g/kg).

L'amélioration de la nutrition ne concerne pas que les aiguilles de l'année courante. En effet, le rapport de concentration "année courante / année antérieure" a diminué pour plusieurs éléments suite à l'amendement. Cet effet est significatif pour K, Ca, Mg, Mn et Zn dans les pessières, mais uniquement pour Mg dans les sapinières. Comme les concentrations en Ca, Mg et Zn dans les aiguilles de l'année courante ont augmenté, et que le rapport de concentration entre années d'aiguilles s'est réduit, on assiste donc non seulement à une amélioration du statut nutritif des aiguilles de l'année en cours, mais à une amélioration encore plus grande de la nutrition des aiguilles de l'année antérieure.

DISCUSSION

Les sites choisis pour cette étude se trouvent tous sur des roches mères pauvres en Ca et Mg. Dambrine *et al.* (1998) ont souligné la fragilité de tels écosystèmes forestiers et ont démontré que, depuis au moins 30 ans, ces derniers subissent une acidification importante. Dupouey *et al.* (1998) ont également observé pour les forêts du Nord-Est de la France, un appauvrissement des sols acides en Ca (3 % par an), Mg (1 % par an) et K entre 1970 et 1990. Plus du tiers des sols étudiés sont passés du stade "acide" à "très acide" durant cette période. À l'échelle de l'Europe, Armbruster *et al.* (2002) rapportent des pertes de Mg de l'ordre de 0,5 à 1,5 kg/ha/an.

• Effets de l'amendement sur les sols

Les sols étudiés ont tous une très faible ECEC (capacité d'échange) (inférieure à 10 cmol⁺/kg) et un taux de saturation (S/T) également très faible (de 4 à 14 % selon la profondeur examinée). Ils sont désaturés et leurs sites d'échange sont principalement occupés par de l'aluminium et des protons (H⁺). Pour des pH très acides (inférieurs à 4), des cations aluminiques, en particulier la forme soluble Al³⁺ considérée comme la plus toxique pour les systèmes racinaires, sont libérés dans la solution du sol. Le ratio entre les teneurs en Ca et Al du complexe absorbant peut être considéré comme indicateur de l'état de stress de la rhizosphère (Bonneau *et al.*, 1992 ; Boudot *et al.*, 1995). Un ratio Ca/Al compris entre 0,1 et 0,2 et un ratio Mg/Al supérieur à 0,05 représentent un minimum souhaitable (Bonneau *et al.*, 1992).

Les résultats obtenus montrent un net effet bénéfique de l'amendement sur les sols, se traduisant par un accroissement du S/T (figure 1, p. 288) : la moyenne pondérée pour les 20 premiers centimètres de sol est passée de 7 % pour les témoins à plus de 24 % pour les placettes amendées. Cet accroissement est accompagné d'une augmentation du pH et des stocks de Ca et Mg (figure 2, p. 289).

L'augmentation du pH et l'enrichissement en profondeur (jusqu'à 50 cm) des nutriments s'accompagnent d'une réduction de l'occupation des sites d'échanges par les cations acidifiants (H⁺ et Al³⁺). Le ratio Ca/Al, inférieur à 0,1 dans les témoins, est passé respectivement à 3,5 et 1,7 dans l'horizon de surface (0-5 cm) des placettes amendées d'Épicéa et de Sapin. Le ratio Mg/Al a lui atteint la valeur 0,72 pour les peuplements d'Épicéa et 1,20 pour les peuplements de Sapin, suggérant donc que l'amendement a permis de corriger une situation nettement défavorable pour les racines ou plutôt favorable à une microflore délétère, telle qu'observée par Devèvre *et al.* (1995).

Les stocks en nutriments (Ca et Mg) des peuplements témoins étudiés sont très faibles. L'amendement a permis la restauration de ces stocks et, après plus de 7 ans, une bonne partie de ce qui a été apporté persiste dans le sol. Pour les pessières, ces stocks, hors immobilisation dans les humus, représentent plus de 50 % des apports en Ca et Mg et plus de 70 % pour les sapinières. L'effet de l'amendement devrait donc se faire sentir de manière durable au cours de la vie des peuplements.

Les stocks de C et N du sol n'ont pas été affectés par l'amendement. Le ratio C/N est demeuré stable, entre 16 et 20. Ainsi l'amendement aurait peu d'effet sur les réserves en C et en N du sol, ce qui est conforme aux résultats obtenus par Matzner *et al.* (1985). Marshner et Wilezynski (1991) avaient observé une diminution du rapport C/N dans des essais d'amendement, dans des conditions expérimentales différentes (type de peuplement, type d'humus, qualité des composés organiques, microflore).

L'amendement a provoqué une accélération de la minéralisation de la matière organique des horizons holorganiques. Pour les peuplements d'Épicéa et de Sapin, la masse de ces horizons a diminué de près de 40 % par rapport aux placettes témoins. La décomposition plus rapide des litières est à relier avec l'évolution de la composition et l'activité de la flore et de la faune du sol (Toutain *et al.*, 1988). Une illustration assez spectaculaire de ce phénomène est donnée par l'apparition notable de turricules de vers de terre sur certaines placettes amendées (photos).



Dispositif expérimental d'Humont dans les Vosges (site n° 7), illustrant la forte activité biologique dans les placettes amendées (ci-contre) comparée aux placettes témoins (ci-dessus)

Photos : Daniel TOURETTE, ONF

- *Effets de l'amendement sur l'état de santé et la nutrition des peuplements*

Les amendements effectués ont mis en évidence un rétablissement de l'état de santé des peuplements étudiés (figure 3, p. 291), déjà sensible après deux années. Cette amélioration va de pair avec celle de la nutrition calcique et magnésienne, constatée tant dans les peuplements d'Épicéa que de Sapin (tableau III, p. 292) (Landmann *et al.*, 1987).

Les teneurs en azote se situent au-dessus du seuil de carence, mais sont cependant relativement faibles, et l'amendement n'a eu aucun effet sur ce paramètre. Un excès d'azote n'a pas été mis en évidence, tout comme pour les aiguilles d'Épicéas croissant sur un site pourtant saturé en azote (Huber *et al.*, 2006). Dans leur cas comme dans le nôtre néanmoins, l'amendement a permis d'améliorer la nutrition en Ca et l'absorption de Mg.

Nous observons que l'amendement réduit la concentration foliaire en potassium, laquelle s'approche ainsi du seuil de carence. Ce résultat n'avait pas été souligné antérieurement lors d'une étude portant sur l'amendement d'Épicéas dans les Ardennes (Belkacem *et al.*, 1992). Ce déséquilibre nutritionnel peut être associé à un antagonisme au niveau de l'absorption racinaire entre Ca et Mg d'un côté et K de l'autre, les faibles réserves du sol en K_2O n'ont pas diminué de façon significative suite à l'amendement (figure 2, p. 289). Par contre, dans des hêtraies des Ardennes, Misson *et al.* (2001) ont observé que l'application d'une dose plus importante de dolomie (3 tonnes/ha) que celle apportée lors de notre étude réduisait également les concentrations en K du sol. En tenant compte de ces faits, il apparaît nécessaire de préconiser un apport complémentaire de K dans des amendements qui seraient effectués dans des sols de pauvreté similaire. Lebourgeois *et al.* (1993) par ailleurs ont également observé dans des sapinières vosgiennes que l'ajout à Ca et Mg d'autres éléments pouvait être bénéfique à la vigueur des peuplements.

- *Effets de l'amendement sur la croissance des arbres*

L'effet de l'amendement que nous observons sur la croissance en surface terrière donne des résultats moins significatifs que ceux obtenus pour la nutrition. C'est sans doute en partie lié à la variabilité des caractéristiques des peuplements (âge, densité, compétition) qui n'ont pas été prises en compte dans les analyses. De plus, les amendements et les mesures de croissance en diamètre n'ont pas été effectués de façon synchrone sur l'ensemble des dispositifs, ce qui ajoute une source de variabilité supplémentaire.

Néanmoins, on constate de façon générale que l'amendement a soutenu, voire accru, la croissance en surface terrière, plus particulièrement pour les peuplements d'Épicéa. Pour cette essence, un gain en surface terrière de près de 38 % est mesuré une dizaine d'années après l'amendement. Ce résultat est conforme à ceux obtenus à l'aide de méthodes dendrochronologiques qui permettent de déceler plus précisément les variations dans le rythme de croissance des arbres. Picard *et al.* (1999) ont observé dans les Ardennes, plus de 20 ans après amendement, une augmentation de 23 à 34 % dans la croissance radiale de l'Épicéa. Lebourgeois *et al.* (1993) ont également constaté une croissance radiale supérieure de 24 % dans les placettes amendées de 4 sapinières du massif vosgien. Sur l'ensemble de leur dispositif, la plus forte stimulation de croissance a néanmoins été obtenue avec l'ajout à l'amendement d'une fertilisation complète. Par contre, Huber *et al.* (2004), sur un site riche du sud de la Bavière (Höglwald), n'ont observé aucun effet de l'amendement sur la croissance d'Épicéas.

Pour les feuillus, une stimulation de la croissance a été obtenue à la suite d'amendements (Picard *et al.*, 1999 ; Moore et Ouimet, 2006). Dans une hêtraie de Fougères (en Ille-et-Vilaine), un gain de 20 % en croissance radiale a été observé par Picard *et al.* (1999). Ce gain essentiellement attribuable à un accroissement du bois initial du Hêtre s'est donc de surcroît traduit par une amélioration de la qualité du bois. Au Québec, sur un podzol, l'application de chaux dolo-

mitique a également stimulé la croissance de l'Érable à sucre (Moore et Ouimet, 2006). Dix années après l'amendement, l'accroissement en surface terrière des érables traités valait près du double de celui des arbres non traités.

- *Effets de l'amendement sur la stabilité des peuplements forestiers*

Les résultats obtenus ici sont conformes à ceux d'études antérieures menées tant en Europe qu'en Amérique (Bonneau, 1995 ; McLaughlin et Wimmer, 1999 ; Moore et Ouimet, 2006). Ces différents travaux visaient, par le biais de l'amendement, à corriger des problèmes nutritionnels associés à une accélération de l'acidification des sols. La plupart de ces études font état d'une revitalisation rapide des écosystèmes jugés initialement "dépérissants". Parmi les principaux effets observés, il y a une amélioration du statut nutritif des arbres, une augmentation de l'absorption de minéraux, un gain de croissance, une stimulation de la production de racines fines, ainsi qu'une distribution plus en profondeur du profil d'enracinement (Bauhus et Bartsch, 1996 ; Bakker, 1999a, 1999b ; Bakker et Nys, 1999).

Cette amélioration des conditions édaphiques pourrait également avoir des répercussions indirectes sur la résistance des peuplements aux vents violents. Ainsi, Mayer *et al.* (2005) ont montré que l'acidité des sols était un facteur de risque important de chablis et Renaud (2002) à partir des dommages observés sur le réseau de surveillance de la santé des forêts (maille 16 x 16 km) a pu observer qu'un enracinement profond favorisait la plus grande stabilité de plusieurs essences aux tempêtes. L'amendement, en stimulant le développement racinaire, contribuerait donc à l'amélioration d'un des paramètres de stabilité au vent des peuplements. Ce même effet permet également d'envisager une plus grande résistance des peuplements à la sécheresse. Récemment, dans un bassin versant où les dépôts acides ont produit un lessivage important du calcium contenu dans le sol (à Hubbard Brook dans le New Hampshire, États-Unis d'Amérique), un sévère épisode de gel a permis d'observer une différence de sévérité des dommages entre placettes témoins et placettes ayant reçu un apport de calcium (Hawley *et al.*, 2006).

Dans le cadre des changements globaux, l'amendement de sols acidifiés semble donc une solution particulièrement intéressante pour restaurer, voire accroître la stabilité des peuplements.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Malgré les récentes réductions de dépôts atmosphériques acides attribuables principalement à une diminution des émissions de soufre, des dépassements des seuils critiques acides sont encore observés en France métropolitaine, notamment dans les Vosges (Moncoulon *et al.*, 2007). Des mesures supplémentaires, surtout en termes de réduction des dépôts azotés, sont requises afin de permettre de restaurer les écosystèmes qui s'appauvrissent. Pour l'Europe de l'Ouest et du Nord, on estime à 10 kg N/ha/an le seuil à partir duquel l'azote cause un appauvrissement des cations basiques, entraînés par le lessivage avec les nitrates. Ce niveau représente le dépôt actuel moyen sur l'ensemble du territoire français (Ulrich *et al.*, 2007).

Pour contrecarrer l'acidification des sols et la perte d'éléments nutritifs, l'amendement a été proposé comme traitement dans de nombreuses forêts dépérissantes aussi bien en Europe qu'en Amérique (Bonneau, 1995 ; Moore et Ouimet, 2006). Son usage s'est répandu en Allemagne, où plus de 2,5 millions d'hectares avaient été amendés en 1994 (Meiwes *et al.*, 2002 ; Huber *et al.*, 2004). Par contre en France, hormis les essais expérimentaux, cette pratique est restée limitée à quelques sites ateliers d'amendement réalisés à l'échelle de peuplements forestiers ou de bassins versants, essentiellement dans le massif vosgien, les Ardennes et la Normandie, représentant un total d'environ 1 000 hectares.

Cette étude, à la suite d'autres (Toutain *et al.*, 1988 ; Bonneau *et al.*, 1992), démontre que l'amendement est bénéfique pour les forêts situées sur des sols qui sont arrivés aujourd'hui à un degré d'acidité tel que leur fonctionnement est fortement perturbé (Nys, 1998) et pour lesquels une restauration spontanée (qui serait liée à une diminution des dépôts acides) est très improbable. Il provoque une amélioration de l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ainsi, il est possible d'affirmer que l'amendement sur sols acides et très désaturés, tels que ceux testés dans les Vosges, les Ardennes ou la Normandie, permet d'améliorer notablement et durablement leur statut nutritif ainsi que la santé des peuplements d'Épicéa, de Sapin ou de Hêtre et contribue indirectement au renforcement de la résistance de ces peuplements envers certains aléas climatiques. Dans ces contextes, l'amendement calco-magnésien, associé ou non à un complément d'éléments fertilisants selon le diagnostic d'analyse du sol, peut être considéré comme un moyen efficace de restauration, qu'il serait judicieux d'utiliser dans le cadre d'une gestion durable des forêts.

Jean-Pierre RENAUD
 Département Recherche
 OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
 Les Merises
 Parc de Haye
 F-54840 VELAIN-EN-HAYE
 (jean-pierre.renaud-o2@onf.fr)

Jean-François PICARD
 Équipe Phytoécologie
 INRA Centre de Nancy
 F-54280 CHAMPENOUX

Claudine RICHTER
 Département Recherche
 OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
 Boulevard de Constance
 F-77300 FONTAINEBLEAU
 (claudine.richter@onf.fr)

Arnaud LEGOUT – Claude NYS
 Équipe Cycles biogéochimiques
 INRA Centre de Nancy
 F-54280 CHAMPENOUX
 (nys@nancy.inra.fr)

BIBLIOGRAPHIE

- ARMBRUSTER (M.), MACDONALD (J.), DISE (N.B.), MATZNER (E.). — Throughfall and output fluxes of Mg in European forest ecosystems: a regional assessment. — *Forest Ecology and Management*, vol. 164, 2002, pp. 137-147.
- AUGUSTO (L.). — Étude de l'impact de quelques essences forestières sur le fonctionnement biogéochimique et la végétation de sols acides. — Nancy : Université Henri Poincaré, Nancy I ; Champenoux : Institut national de la Recherche agronomique de Nancy, 1999. — 90 p. + annexes (Thèse de doctorat en sciences de la terre).
- BAKKER (M.R.). — The effect of liming and gypsum applications on a sessile oak (*Quercus petraea* (M.) Liebl.) stand at La Croix-Scaille (French Ardennes) II. Fine root dynamics. — *Plant and Soil*, vol. 206, 1999a, pp. 109-121.
- BAKKER (M.R.). — Fine-root parameters as indicators of sustainability of forest ecosystems. — *Forest Ecology and Management*, vol. 122, 1999b, pp. 7-16.

- BAKKER (M.R.), GARBAYE (J.), NYS (C.). — Effect of liming on the ectomycorrhizal status of oak. — *Forest Ecology and Management*, vol. 126, 2000, pp. 121-131.
- BAKKER (M.R.), NYS (C.). — Effects of lime-induced differences in site fertility on fine roots of oak. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 56, 1999, pp. 599-606.
- BAUHUS (J.), BARTSCH (N.). — Fine-root growth in beech (*Fagus sylvatica*) forest gaps. — *Journal canadien de la Recherche forestière*, vol. 26, 1996, pp. 2153-2159.
- BELKACEM (S.), NYS (C.), GELHAYE (D.). — Effet d'une fertilisation et d'un amendement sur l'immobilisation d'éléments dans la biomasse d'un peuplement adulte d'Épicéa commun (*Picea abies* L. Karst.). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 49, 1992, pp. 235-252.
- BONNEAU (M.). — Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Théorie, bases du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales. — Nancy : ENGREF, 1995. — 367 p.
- BONNEAU (M.), LANDMANN (G.), ADRIAN (M.). — La Fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide : essais dans les Vosges. — *Revue forestière française*, vol. XLIV, n° 3, 1992, pp. 207-223.
- BONTEMPS (J.-D.). — Évolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XX^e siècle. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 2006 (Thèse de doctorat).
- BOUDOT (J.-P.), BECQUER (T.), MERLET (D.), ROUILLER (J.), RANGER (J.), DAMBRINE (E.), MOHAMED (D.A.). — Potential role of aluminium toxicity in nutrient deficiencies as related to forest decline: An assessment of soil solution data from the Vosges mountains (France). In : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1995. — pp. 270-285.
- CITEPA. — Émissions dans l'air en France. Métropole. Substances impliquées dans les phénomènes d'acidification, d'eutrophisation et de la photochimie. — Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique, mise à jour du 14 mai 2003. — 17 p. Site internet : <http://www.citepa.org/pollution/index.htm>.
- CLUZEAU (C.), DUPOUEY (J.-L.), DRAPIER (J.), VIRION (R.). — Étude des modifications à long terme de la végétation forestière à partir des données de l'IFN. — *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, pp. 413-419.
- CROISÉ (L.), CLUZEAU (C.), ULRICH (E.), LANIER (M.), GOMEZ (A.). — RENECOFOR - Interprétation des analyses foliaires réalisées dans les 102 peuplements du réseau entre 1993 et 1997 et premières évaluations interdisciplinaires. — ONF - Département Recherche et Développement, 1999. — 413 p.
- DAMBRINE (E.), THOMAS (A.-L.), PARTY (J.-P.), PROST (A.), BOUDOT (J.-P.), DUC (M.), DUPOUEY (J.-L.), GÉGOUT (J.-C.), GUÉROLD (F.), KING (D.), LANDMANN (G.), MAITAT (O.), NICOLAI (M.), POLLIER (B.), THIMONIER (A.). — Acidité des écosystèmes forestiers dans les Vosges gréseuses : distribution, évolution, rôle des dépôts atmosphériques et conséquences biologiques. — *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 84, 1998, pp. 75-94.
- DEVÈVRE (O.), GARBAYE (J.), LE TACON (F.), PERRIN (R.), ESTIVALET (D.). — Role of the rhizospher microfungi in the decline of Norway spruce in acidic soils. In : Forest decline and atmospheric deposition effects in the French mountains / G. Landmann, M. Bonneau Eds. — Berlin : Springer Verlag, 1995. — pp. 331-352.
- DUPOUEY (J.-L.), THIMONIER (A.), LEFÈVRE (Y.), LE TACON (F.), BONNEAU (M.), DAMBRINE (E.), POSZWA (A.), LANDMANN (G.). — Désaturation et enrichissement en azote des sols forestiers du Nord-Est de la France au cours des dernières décennies. — *Revue forestière française*, vol. L, n° 5, 1998, pp. 391-401.
- DUPOUEY (J.-L.), NYS (C.), BADEAU (V.), BELKACEM (S.). — Stock de carbone dans les sols de France : quelles estimations ? — *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 85, 1999, pp. 278-292.
- DSF. — Réseau de surveillance de l'état sanitaire des forêts (Réseau européen). Protocole pour les observations. — Paris : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, 1997.
- HAWLEY (G.J.), SCHABERG (P.), EAGAR (C.), BORER (C.H.). — Calcium addition at the Hubbard brook experimental forest reduced winter injury to red spruce in a high-injury year. — *Journal canadien de la Recherche forestière*, vol. 36, 2006, pp. 2544-2549.
- HUBER (C.), KREUTZER (K.), ROHLE (H.), ROTHE (A.). — Response of artificial acid irrigation, liming, and N-fertilisation on elemental concentrations in needles, litter fluxes, volume increment, and crown transparency of a N saturated Norway spruce stand. — *Forest Ecology and Management*, vol. 200, 2004, pp. 3-21.

- HUBER (C.), WEIS (W.), GÖTTLEIN (A.). — Tree nutrition of Norway spruce as modified by liming and experimental acidification at the Höglwald site, Germany, from 1982 to 2004. — *Annals of Forest Science*, vol. 63, 2006, pp. 861-869.
- LANDMANN (G.), BONNEAU (M.), ADRIAN (M.). — Le Dépérissement du Sapin pectiné et de l'Épicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements ? — *Revue forestière française*, vol. XXXIX, n° 1, 1987, pp. 5-11.
- LEBOURGEOIS (F.), BECKER (M.), BONNEAU (M.). — Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. — *Revue forestière française*, vol. XLV, n° 6, 1993, pp. 639-650.
- LEGOUT (A.). — Cycles biogéochimiques et bilans de fertilité minérale en hêtraies de plaine. — Nancy : Université Henri Poincaré, Nancy I ; Champenoux : Institut national de la Recherche agronomique de Nancy, 2008 (Thèse de doctorat en sciences de la terre).
- MARSHNER (B.), WILEZYNSKI (A.W.). — The effect of liming on quantity and chemical composition of soil organic matter in a pine forest in Berlin, Germany. — *Plant and Soil*, vol. 137, 1991, pp. 229-236.
- MATZNER (P.K.), KHANNA (P.K.), MEIWES (K.J.), ULRICH (B.). — Effect of fertilization and liming on the chemical soil conditions and elements distribution in forest soil. — *Plant and Soil*, vol. 87, 1985, pp. 405-415.
- MAYER (P.), BRANG (P.), DOBBERTIN (M.), HALLENBARTER (D.), RENAUD (J.-P.), WALTHERT (L.), ZIMMERMANN (S.). — Forest storm damage is more frequent on acidic soils. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 62, 2005, pp. 303-311.
- McLAUGHLIN (S.), WIMMER (R.). — Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. — *New Phytologist*, vol. 142, 1999, pp. 373-417.
- MEIWES (K.J.), MINDRUP (M.), KHANNA (P.K.). — Retention of Ca and Mg in the forest floor of a spruce stand after application of various liming materials. — *Forest Ecology and Management*, vol. 159, 2002, pp. 27-36.
- MISSION (L.), PONNETTE (Q.), ANDRÉ (F.). — Regional scale effects of base cation fertilization on Norway spruce and European beech stands situated on acid brown soils: soil and foliar chemistry. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 58, 2001, pp. 699-712.
- MONCOULON (D.), PROST (A.), MARTINSON (L.). — Modeling acidification recovery on threatened ecosystems: application to evaluation of the Gothenburg protocol in France. — *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 7, 2007, pp. 307-316.
- MOORE (J.D.), OUMET (R.). — Ten-year effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigour, and growth of sugar maple. — *Journal canadien de la Recherche forestière*, vol. 36, 2006, pp. 1834-1841.
- NYS (C.). — Gestion durable de la fertilité de l'écosystème hêtraie acidiphile de basse altitude. — Rapport scientifique GIP ECOFOR. 1998. — 114 p.
- PERRIAUX (J.). — Contribution à la géologie des Vosges gréseuses. — Mémoire du Service des cartes géologiques d'Alsace et de Lorraine (Strasbourg), n° 18, 1961, 236 p.
- PICARD (J.-F.), BECKER (M.), NYS (C.), DUPOUEY (J.-L.). — Évolution à moyen terme de la croissance radiale de l'Épicéa et du Hêtre en relation avec la fertilisation/amendement : analyse dendroécologique. — *Revue forestière française*, vol. LI, n° 2, 1999, pp. 197-218.
- RENAUD (J.-P.). — Première évaluation de la sensibilité des peuplements forestiers aux tempêtes à partir des dommages subis par le réseau européen. — *Les Cahiers du DSF*, vol. 1, 2002, pp. 81-84.
- SOUCHIER (B.). — Évolution des sols sur roches cristallines à étage montagnard (Vosges). — Mémoire du Service des cartes géologiques d'Alsace et de Lorraine (Strasbourg), n° 33, 1971, 132 p.
- TOUTAIN (F.), DIAGNE (A.), LE TACON (F.). — Possibilités de modification du type d'humus et d'amélioration de la fertilité des sols à moyen terme en hêtraie par apport d'éléments minéraux. — *Revue forestière française*, vol. XL, 1988, n° 2, pp. 99-107.
- ULRICH (E.), LANIER (M.), CROISÉ (L.). — Évolution de l'acidité, des concentrations de soufre et de l'azote dans les précipitations analysées dans le réseau Renécofor (période 1993-2005). — *Rendez-vous Techniques ONF*, n° 15, 2007, pp. 3-8.

AMENDEMENTS CALCO-MAGNÉSIENS ET FONCTIONNEMENT ÉCOLOGIQUE : BILAN DES EXPÉRIENCES CONDUITES DANS L'EST DE LA FRANCE (MASSIF VOSGIEN ET ARDENNES) [Résumé]

Afin de remédier aux symptômes de dépérissement de peuplements d'Épicéa et de Sapin, un amendement calco-magnésien a été appliqué à raison d'une dose de 2,5 Mkg/ha. Ces impacts sur la croissance, l'aspect sanitaire des houppiers, ainsi que les teneurs en nutriments des aiguilles, de l'humus, et des horizons minéraux du sol ont été évalués. D'une façon générale, l'amendement a stimulé l'activité biologique du sol et la croissance des arbres s'est accrue, principalement dans les pessières et les stations les moins fertiles. Les teneurs foliaires en calcium (Ca) et magnésium (Mg), initialement voisines du seuil de carence, ont augmenté pour s'approcher de leur optimum. Par contre, une réduction de la nutrition en potassium (K) a également été observée. L'état général des houppiers s'est rapidement amélioré dans la majorité des sites. Cette étude conforte donc l'hypothèse que l'amendement restaure la fertilité chimique des sols par le biais d'une amélioration des cycles biogéochimiques et permet de constater qu'après une dizaine d'années, une grande partie des éléments apportés ont été conservés dans le sol, suggérant un effet durable de cet amendement.

CALCIUM AND MAGNESIUM AMENDMENTS AND ECOLOGICAL FUNCTIONING – OVERVIEW OF EXPERIMENTS CONDUCTED IN EASTERN FRANCE - VOSGES MASSIF AND ARDENNES [Abstract]

A calcium-magnesium amendment was applied to remedy dieback symptoms on spruce and pine stands at a dose of 2.5 tons/ha. Its impact on growth, visual aspect of the crowns, and nutrient content in needles, humus and mineral horizons of the soil were assessed. Generally speaking, this amendment stimulated the biological activity of the soil and trees grew faster, mainly in the spruce population and the less fertile sites. Calcium (Ca) and magnesium (Mg) content of leaves, which was initially close to the deficiency threshold, increased and approached the optimum value. On the other hand, a reduction in potassium (K) nutrition was also observed. The overall condition of the crowns quickly improved at most sites. This study supports the idea that amendments restore the chemical fertility of soils through a process that enhances the bio-geochemical cycles. It also shows that after some ten years, much of the material applied was still in the soil, suggesting that the amendment had a durable effect.
