

lorsque les arbres sont encore jeunes (à cause de l'importante production de nitrates, réminiscence du passé agricole), mais ne cessent de diminuer. À Aubure, au contraire, elles étaient faibles au départ, mais n'ont cessé d'augmenter : le sol est incapable de fixer les éléments minéralisés.

Sur ce site, les bilans montrent que la forêt ne pourra continuer à produire la même quantité de bois qu'à l'aide d'apports artificiels. À Vauxrenard, le bilan courant dans la forêt de 60 ans tend vers l'équilibre : elle devrait se maintenir moyennant des révolutions longues (on a calculé que les bilans moyens annuels ne sont équilibrés qu'à partir de 120 ans), une récolte des seuls troncs (on laisse les branches pour faire des litières) et un amendement limité, apportant du calcium et du magnésium.

Le dépérissement des forêts des années 1980 a été associé à une pollution atmosphérique diffuse, qui a traversé les frontières. Même s'il est limité, ce type de pollution joue le rôle d'un

facteur aggravant et peut créer des dysfonctionnements dans les situations d'équilibre précaire. Dans des sols pauvres en minéraux altérables, des éléments toxiques pour les arbres ou pour les microorganismes symbiotiques peuvent être libérés (par exemple, l'aluminium). Paradoxalement, les pollutions atmosphériques ont un rôle positif à faible dose : elles apportent des éléments nutritifs. Elles participent à l'équilibre des écosystèmes naturels et si elles cessaient, la production des forêts exploitées de façon extensive diminuerait. En fait, elles n'ont pas de rôle négatif tant qu'elles ne dépassent pas la capacité des écosystèmes à les absorber.

L'observation des sols

Nous avons observé de façon continue les forêts où nous avons calculé ces bilans, ainsi que d'autres forêts remarquables (dépérissantes, fragiles, reliques d'un climat passé...), notamment celle de Donon, dans les Vosges, où l'acidification est préoccupante, depuis 1985 : le sol fixe de moins en moins les cations alcalins et alcalino-terreux. La succession d'années exceptionnellement chaudes s'est traduite par une minéralisation excessive des couches organiques, libérant beaucoup d'éléments qui n'ont ni été absorbés par les arbres, ni fixés temporairement par le sol minéral sous-jacent. La fertilité de ces sols acides sera donc difficile à restaurer. Plusieurs travaux ont montré que les sols du Nord-Est de la France s'étaient acidifiés depuis 20 ans. C'est aussi le cas de la plupart des sols forestiers d'Europe et d'Amérique du Nord.

Pour suivre l'évolution de la qualité des sols, l'Office national des forêts a mis en place le réseau «Rénécofor» (le Réseau national de surveillance des écosystèmes forestiers), constitué de plus de 100 stations de mesures situées dans des écosystèmes forestiers représentatifs. Nous avons travaillé sur des données acquises *in situ* dans ces stations depuis sept ans, en collaboration avec l'Office national des forêts. Dans quelques années, ces suivis nous permettront d'avoir une vue d'ensemble de l'évolution de la forêt française.

Pour éviter d'avoir à suivre un écosystème en permanence, ce qui demande beaucoup de temps, et pour obtenir des résultats dans des situations écologiques plus diversifiées, nous avons mis au

point des approches expérimentales *in situ*, utilisant des sondes qui explorent l'écosystème sans le perturber.

La méthode des minéraux tests consiste à introduire dans le sol des silicates à structure lamellaire, qui ressemblent à du mica et à étudier les composés qui se fixent entre les feuillets. Ainsi, le spectre des ions fixés révèle si le sol est acide ou basique et si des complexes chimiques se forment : ce sont des indicateurs de l'évolution du sol vers un sol brun ou vers un podzol. Après avoir placé des minéraux test dans les différents horizons du sol et les y avoir laissé séjourner de six mois à dix ans, on les récupère et l'on caractérise leur évolution minéralogique par les méthodes classiques d'analyse minérale, telle la microscopie électronique (voir la figure 7), la spectroscopie ou la diffraction des rayons X.

Jusqu'à présent, on pensait que la morphologie des sols, et leur éventuelle différenciation en plusieurs horizons distincts, était révélatrice de leur fonctionnement actuel. La méthode des minéraux-test a d'emblée remis en cause ces relations univoques. Il existe effectivement des cas de fonctionnement des sols en accord avec leur différenciation morphologique en plusieurs horizons, mais certains sols ne sont que les reliques d'une pédogenèse révolue, et leur fonctionnement a changé. Par exemple, les podzols du bassin parisien ne fonctionnent plus selon un mécanisme de podzolisation, c'est-à-dire de destruction des minéraux des horizons supérieurs par les acides.

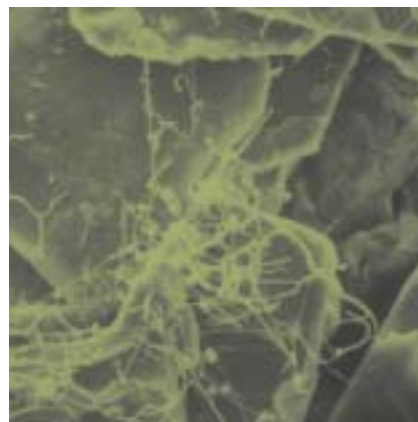
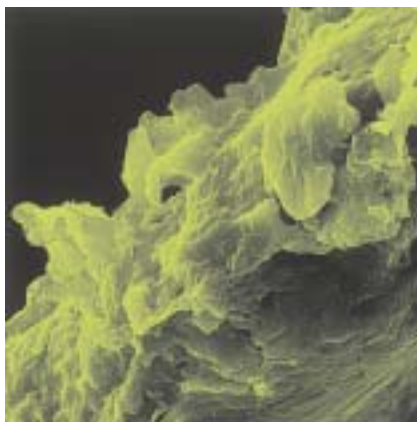
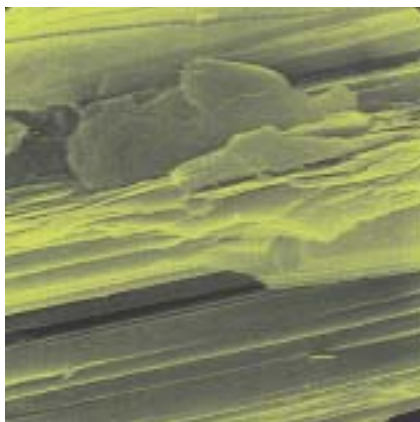
Grâce à cette méthode des minéraux test, nous avons identifié l'évolution actuelle des sols sous l'influence de la sylviculture. Notamment, nous avons classé les essences en fonction du degré d'acidité qu'elles confèrent aux sols sur lesquels elles poussent. Ainsi, l'épicéa commun acidifie plus les sols que le pin et que le sapin, lesquels l'acidifient plus que le Douglas, qui a lui-même un pouvoir plus acidifiant que le hêtre et le chêne : ces résultats aideront les sylviculteurs qui souhaitent introduire une essence dans un contexte donné, en particulier dans les milieux sensibles à l'acidification.

La méthode des traceurs isotopiques s'est beaucoup développée depuis les années 1960 : on introduit dans un compartiment de l'écosystème une faible dose de traceur isotopique, qui est ensuite transférée à d'autres compar-



D. Gellhaye

6. SUR LES ÉPICÉAS DÉPÉRISSENT de la forêt d'Aubure, on récupère l'eau de pluie qui ruisselle le long des troncs, afin d'analyser les éléments qu'elle contient et d'intégrer ces données dans le calcul des bilans d'éléments nutritifs sur l'écosystème forestier.



7. LES MINÉRAUX TEST sont des silicates à structure lamellaire semblables à du mica, que l'on introduit dans le sol et que l'on y laisse séjourner pendant quelques années avant d'étudier les composés qui se fixent entre les feuillets et qui sont des indicateurs d'une évolution vers un sol brun ou vers un podzol. Ces images réalisées par

microscopie électronique montrent des minéraux test avant (à gauche) et après (au milieu et à droite) leur séjour dans le sol. À gauche, les feuillets sont rectilignes, tandis qu'au milieu, ils se sont fragmentés et de la matière organique s'est accumulée entre les feuillets et, à droite, l'espace interfoliaire a été colonisé par des champignons.

timents en suivant différents cycles biogéochimiques, sans perturbation du fonctionnement normal du système.

Nous avons, par exemple, vaporisé le feuillage de plants de hêtre pendant plusieurs années avec un isotope stable de l'azote (l'azote 15) pour produire de la litière marquée. En dosant cet isotope dans les différents compartiments de l'écosystème (la litière apportée au sol, le sol et les solutions qu'il contient, la microflore, les végétaux), on détermine le flux de l'élément entre ces compartiments, voire d'éventuels mécanismes de fractionnement isotopique, c'est-à-dire des réactions physico-chimiques qui aboutissent à l'enrichissement ou à l'appauvrissement des compartiments en cet isotope.

Dans les litières fraîches, la concentration en carbone décroît de façon exponentielle avec le temps, tandis que celle de l'azote reste constante pendant trois à quatre ans. Avec la méthode des traceurs isotopiques, on a découvert que la concentration en azote évolue en fait comme celle du carbone, mais que des bactéries et les champignons qui décomposent le sol apportent de l'azote supplémentaire, de sorte que la concentration totale des feuilles en décomposition ne varie pas.

Dans plusieurs types de forêts boréales, tempérées ou tropicales, nous avons localisé les horizons où les racines prélèvent les éléments nutritifs, en suivant les concentrations en isotopes du strontium. Nous avons découvert que l'épicéa prélève ses éléments nutritifs près de la surface, contrairement au pin qui les puise plus profondément. En outre, les racines profondes des arbres tropi-

caux, qui plongent parfois jusqu'à 30 ou 40 mètres pour l'eucalyptus, ne semblent pas prélever d'éléments nutritifs en profondeur.

Un laboratoire en pleine forêt

Nous avons étudié la composition isotopique du strontium et du carbone dans les cernes du bois d'épicéa des Vosges. Elle montre que l'acidification du sol est ancienne. On sait que le strontium se comporte à peu près comme le calcium et l'on déduit des analyses que la concentration en calcium avait déjà beaucoup diminué dans le sol, dès les années 1950. Le dépérissement s'est manifesté bien après que l'acidification a débuté. Ainsi, il apparaît indispensable de prévoir ces dysfonctionnements avant qu'ils ne se manifestent. C'est l'un des enjeux de nos recherches.

Les travaux que nous avons réalisés depuis 20 ans partent tous du constat que les écosystèmes naturels doivent être abordés dans leur complexité. Aujourd'hui, nous essayons de transporter nos appareils de mesure vers le terrain étudié, pour observer

son fonctionnement réel *in situ*, au lieu de transporter des échantillons de sol vers les laboratoires.

Nous avons montré que les sols évoluent sous l'influence de contraintes à la fois internes, telle l'acidité, et externes, tels les usages passés et présents du terrain ou les pollutions atmosphériques, de sorte que leur morphologie n'est pas le meilleur indicateur de leur fonctionnement actuel. Les sols forestiers français ont tous plus ou moins subi les conséquences des activités humaines, qui laissent des traces pendant longtemps et qui sont déterminantes dans leur fonctionnement actuel. Enfin, le sol est une ressource vitale non renouvelable qu'il ne faut pas épuiser.

Dans certains cas de cultures intensives, une gestion des arbres fondée sur nos résultats, respectueuse de l'environnement, pourrait être mise en place. Cette ligniculture produirait une biomasse, c'est-à-dire une énergie renouvelable, qui limiterait la consommation d'énergie fossile et absorberait du dioxyde de carbone. Le cas échéant, elle permettrait de recycler une partie des déchets domestiques comme engrais.

Jacques RANGER est responsable de l'Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers, à l'INRA de Nancy.

J. RANGER et M. BONNEAU, *Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêt. Le cycle biologique en forêt*, in *Revue Forestière Française*, vol. 36, n° 2, pp. 93-112, 1984.

J. RANGER, R. MARQUES et M. COLIN-

BELGRAND, *Nutrient dynamics during the development of a Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb., Acta Oecologia, vol. 18, n° 2, pp. 73-90, 1997.*

J. RANGER, R. MARQUES et A. GRANIER, *Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) stands on the Beaujolais Mounts (France), in *Forest Ecology and Management*, vol. 92, pp. 167-197, 1997.*