

ment représentent la moitié de la superficie de la forêt française et fournissent la plus grande partie de la production nationale de bois : ce sont des forêts de chênes, de hêtres, de sapins, d'épicéas, de pins et de Douglas, notamment. Dans ce type d'exploitation, les ressources du sol risquent de se raréfier et sa fertilité de diminuer, car les éléments nutritifs que les arbres ont absorbés sont soustraits de l'écosystème avec le bois lors des récoltes et ne lui sont pas restitués. Enfin, le troisième type de forêts correspond aux cultures intensives, telles les plantations de peupliers, ou d'eucalyptus dans le Midi, pour faire de la pâte à papier ou des panneaux de bois aggloméré. Comme dans le cas des cultures agricoles, les espèces sont améliorées sur le plan génétique et les sols sont enrichis par des engrais ; on utilise des désherbants pour éliminer les espèces concurrentes.

La régulation de l'acidité

Lorsque l'exploitation est trop intensive, l'un des risques les plus fréquents est l'acidification du sol. Tous les sols s'acidifient naturellement, mais la fertilité des sols agricoles est souvent garantie par divers amendements, contrairement à celle des sols forestiers. L'acidification résulte de la solubilisation par les eaux de pluie du dioxyde de carbone atmosphérique qui libère de l'acide carbonique. La respiration des micro-organismes produit également du dioxyde de carbone qui libère *in situ* de l'acide carbonique. La matière organique qui se décompose libère d'autres acides. En fonction des écosystèmes, il s'agit d'acide nitrique, citrique, oxalique, malique... Enfin, les plantes prélèvent des cations dans le sol. Comme l'équilibre ionique se conserve, l'absorption des cations s'accompagne de la libération d'ions H^+ acides.

Toutefois, les sols ont un pouvoir tampon, c'est-à-dire une capacité à neutraliser les acides. Le pouvoir tampon est assuré par les réserves minérales du sol, tels les carbonates dans les sols calcaires, les silicates dans les sols neutres, ou les composés de l'aluminium dans les sols acides, voire du fer dans les sols très acides. Le couplage entre les différents mécanismes qui siègent dans les sols en détermine l'évolution : quand l'acide nitrique produit par la décomposition de la matière organique est immédiatement prélevé par les plantes, le sol ne s'acidifie pas.

Sinon, il est neutralisé par altération des minéraux, qui s'épuisent progressivement. Au final, l'acidification progresse. Les sols acides épurent moins les eaux de surface que les sols neutres, produisent moins de bois et leur biodiversité est plus faible. Si le sous-sol ne les neutralise pas, ils risquent de transmettre leur acidité aux ruisseaux, comme dans de nombreuses forêts de résineux qui poussent sur des roches mères pauvres, dans les Vosges. Pour prévenir l'acidification ou pour y remédier, les pédologues étudient les mécanismes d'acidification et les espèces qui intensifient l'acidité. Ils évaluent les quantités d'acides susceptibles de se former dans le sol et la capacité de ce dernier à les neutraliser.

Quand la récolte des arbres s'intensifie, les éléments nutritifs prélevés dans l'écosystème risquent de s'épuiser : c'est le cas dans les exploitations semi-intensives, qui ne sont pas amendées. Autrefois, on enlevait l'écorce des arbres avant de les transporter hors de la forêt, parce qu'elle contient plus d'éléments nutritifs que le bois, mais cette pratique a disparu.

Pour compenser la perte de production liée à la dégradation de la fertilité des sols, on introduit souvent de

nouvelles essences, par exemple des conifères, qui produisent des quantités de biomasse importantes, même sur des sols pauvres. Les conifères ont notamment été introduits en nombre dans des écosystèmes dégradés par les activités humaines, quand le bois était la principale source d'énergie pour l'industrie. Toutefois, ils perturbent le fonctionnement de l'écosystème, car ils gardent leurs aiguilles toute l'année et interceptent davantage la pluie, les polluants et la lumière. Le « climat » à l'intérieur du sol, ou pédoclimat, est modifié, ainsi que l'activité biologique.

Les méthodes d'exploitation sont également déterminantes dans l'évolution des sols. Les peuplements denses et monospécifiques sont toujours moins favorables que les peuplements hétérogènes et de faible densité. Une densité trop forte est néfaste, car il y a moins d'eau et moins de lumière qui parviennent jusqu'au sol. La longueur de la révolution forestière, entre le semis ou la mise en terre du jeune plant et le moment où l'on coupe l'arbre, intervient aussi, ainsi que la méthode de récolte : une récolte par coupe à blanc sur de grandes surfaces, où l'on maintient le sol à nu pendant longtemps pour favoriser la pousse des



3. LA FERTILITÉ MINÉRALE des sols forestiers se compose de la fertilité actuelle, c'est-à-dire des éléments nutritifs directement assimilables par les micro-organismes et par les plantes, et de la fertilité à long terme, c'est-à-dire de la réserve totale en éléments nutritifs. Ceux-ci deviennent biodisponibles par altération des minéraux encore présents dans le sol et par « minéralisation » des matières organiques, lesquelles sont dégradées en molécules plus petites et en ions minéraux.



4. DANS LES SOLS PAUVRES (à gauche), tel ce podzol de la forêt de Fontainebleau, la matière organique s'accumule en surface, formant une couche noire. Sa dégradation incomplète libère des acides, qui attaquent les minéraux, de sorte qu'en surface, le sol n'est plus qu'un «squelette» de quartz blanc cendré. La pluie lessive les substances présentes à la surface et les draine en profondeur : elles s'accumulent au-dessus du substrat rocheux où elles forment un «horizon» noir. Le substrat rocheux est une couche de sable teintée en ocre par de l'oxyde de fer. Dans les sols riches (à droite), tel ce sol brun de la forêt d'Eu, en Normandie, la matière organique qui s'accumule en surface est dégradée. Les minéraux du sol neutralisent l'acidité, de sorte qu'il n'y a pas de différenciation nette en horizons.

jeunes plants, réduit la fertilité du sol à cause de l'érosion physique (c'est-à-dire une perte de matière entraînée par les eaux de ruissellement) et chimique (liée à la minéralisation brutale des couches organiques habituellement protégées par la végétation).

La forêt, un épurateur de la basse atmosphère

À partir des années 1960, les pédologues ont réalisé que la seule étude du sol ne suffisait pas pour comprendre et modéliser son fonctionnement, mais qu'ils devaient prendre en compte l'ensemble de l'écosystème forestier, voire celui des eaux de surface et de l'atmosphère. L'UNESCO a lancé des programmes internationaux de recherche dans cette direction.

En utilisant les techniques de l'informatique, de la miniaturisation et de la modélisation, nous étudions *in situ*, avec une bonne résolution spatiale et temporelle, le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Aujourd'hui, les progrès dans ce domaine sont rapides.

Le fonctionnement minéral d'un écosystème résulte d'une somme de mécanismes regroupés sous le terme de «cycles biogéochimiques» : les divers éléments circulent en permanence du sol à la plante et de la plante au sol. Ces cycles sont ouverts sur l'extérieur par les apports atmosphériques et par les

pertes par drainage vers les nappes phréatiques et vers les eaux de surface.

L'atmosphère fournit de nombreux composés qui se déposent sur le feuillage. Celui-ci concentre les rejets atmosphériques de sorte que la forêt joue un rôle d'épurateur de la basse atmosphère. Elle piège des dépôts «secs», c'est-à-dire des particules et des rejets gazeux, des dépôts «humides», où les éléments sont en solution dans l'eau de pluie, et des dépôts «occultes», les aérosols des brouillards. Ces pollutions résultent des activités domestiques ou industrielles, de la circulation automobile et de l'agriculture. Elles viennent parfois de loin : certains pays luttent contre leur pollution, mais, ce faisant, polluent leurs voisins. Par exemple, quand on accroît la taille des cheminées d'usine, pour que les fumées soient envoyées plus haut, on exporte sa pollution ; quand on creuse des fosses à fumier pour éliminer de l'ammoniac sous forme gazeuse, on pollue la basse atmosphère et l'on contamine les forêts, à plus ou moins long terme et à plus ou moins longue distance.

L'azote qui se dépose sur les feuilles peut être directement absorbé, tandis que le potassium, le calcium et le magnésium restent en surface et sont lessivés par les pluies. Ces éléments pénètrent dans le sol. Les apports d'azote, en général les plus importants, sont en moyenne de 15 kilogrammes

par hectare et par an, en France, mais atteignent parfois 30 kilogrammes.

Pour caractériser le fonctionnement actuel des sols, et non plus seulement celui qui a présidé à leur genèse, nous avons quantifié les stocks d'éléments minéraux dans les principaux compartiments de l'écosystème, ainsi que les échanges entre ces compartiments et avec l'extérieur. Après avoir prélevé quelques grammes de sol dans les divers horizons ou de tissus dans les différents organes des plantes (tronc, feuilles...), nous en avons réalisé l'analyse élémentaire. Nous avons également travaillé sur des forêts d'âges différents, pour tenir compte des variations temporelles. Dans le cas d'écosystèmes telles les forêts de chênes, où la période de révolution peut atteindre 250 ans, on ne peut suivre l'évolution du sol en même temps que les arbres grandissent : ce serait trop long. En outre, nous devons prendre en compte la variation des facteurs externes au cours du temps, telle la pollution ou la modification du climat.

Nous avons utilisé une approche chronologique : des forêts d'âges croissants situées dans des conditions strictement identiques sont considérées comme les différents stades de développement d'une même forêt. Notamment à Vauxrenard, dans le Beaujolais, nous avons travaillé sur des peuplements de Douglas de 1, 20, 40 et 60 ans, qui ont été suivis chaque mois pendant sept ans, de façon à observer les effets des fluctuations climatiques saisonnières et annuelles sur le fonctionnement de l'écosystème forestier.

Les résultats de la quantification des flux d'éléments dans les sites de Douglas du Beaujolais montrent que les arbres ne puisent qu'une partie des éléments dont ils ont besoin pour leur croissance dans le sol. Cette partie représente, pour l'azote, un peu plus de la moitié seulement de l'ensemble des besoins. Le reste migre des organes sénescents vers les organes en croissance, par un mécanisme de recyclage interne à la plante. Quand l'arbre vieillit, les cernes des années précédentes se vident de leurs éléments nutritifs. De plus, quand les feuilles jaunissent, elles perdent la moitié de l'azote qu'elles contenaient. Celui-ci est alors stocké temporairement par l'arbre pour être à nouveau utilisé au printemps suivant.

De plus, l'essentiel des éléments prélevés dans le sol y retourne par les litières (plus de 80 pour cent de l'azote