

qui creusent des galeries dans les arbres. Vers 1850, un dépérissement semblable s'est produit en région parisienne. En 1956, en Provence, le pin maritime des Maures a commencé à disparaître à cause de fortes gelées hivernales suivies d'une attaque de cochenille sur les arbres affaiblis. En 1985, dans les Landes de Gascogne, le pin maritime a dépéri à cause du froid et des attaques d'Armillaire (un champignon parasite). En 1976, dans la forêt de Tronçais, située dans l'Allier, le chêne a dépéri sous l'effet combiné de la sécheresse et d'une mauvaise adaptation de l'espèce : cette forêt avait été plantée sous Colbert au XVII^e siècle pour fournir du bois aux chantiers navals.

L'épisode des années 1980 n'était donc pas le premier, mais c'est alors que l'on a réalisé combien l'équilibre écologique des forêts, notamment des forêts cultivées, est important : les quantités d'éléments nutritifs qui sortent de l'écosystème, avec le bois récolté ou dans les eaux d'infiltration, ne doivent pas excéder les quantités apportées par l'atmosphère et par l'altération des minéraux du sol. Pour comprendre les causes du dépérissement des forêts, et, plus généralement, pour prévenir les dysfonctionnements,

les pédologues ont étudié les flux d'éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers, flux qui jouent un rôle important dans l'équilibre écologique. Depuis quelques années, notre équipe a établi des bilans quantitatifs des principaux éléments nutritifs entant et sortant des écosystèmes forestiers. Ces éléments sont l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium. Nous cherchons ainsi à élaborer des modèles pour prévoir les aménagements, l'exploitation ou la pollution tolérables par les forêts, sans que les fonctions agronomiques, écologiques et environnementales du sol ne soient perturbées.

Avec quelle intensité peut-on exploiter une forêt ? Au-delà de quelles concentrations les polluants sont-ils dangereux pour les arbres ? Comment peut-on compenser les effets néfastes de sylvicultures inadaptées, d'une pollution chronique ou de phénomènes conjoncturels, telle la tempête de décembre 1999 ? Comment restaurer les sites endommagés ? Telles sont les questions auxquelles nous tentons de répondre. En outre, avec les risques de réchauffement climatique, la préservation des sols forestiers semble d'autant plus importante que les arbres qui absorbent le dioxyde de carbone

jouent un rôle notable dans la régulation de sa concentration atmosphérique et par conséquent de l'effet de serre.

Le fonctionnement des sols forestiers

Comme tous les types de sols, les sols forestiers résultent de l'action de facteurs liés au climat, telles la pluie et la température, et de celle des organismes vivants micro- ou macroscopiques, sur un substrat nommé roche mère. Avec le temps, celle-ci se différencie en plusieurs « horizons », c'est-à-dire en plusieurs couches de sol qui se distinguent notamment par leur couleur. Les horizons superficiels s'enrichissent en matière organique provenant des litières (les feuilles mortes qui tombent sur le sol) ; cette couche de débris végétaux, plus ou moins décomposés par les micro-organismes, repose sur le sol minéral.

1. LES RÉSERVES NATURELLES, telle la réserve de la Tillaie, dans la forêt de Fontainebleau (a), sont très peu nombreuses en France. Les autres forêts françaises, issues de régénération naturelle, telle la hêtraie de la forêt de Haye en Lorraine (b) ou plantées, telle la forêt d'épicéa de Moncel, également en Lorraine (c), sont exploitées, parfois de façon intensive, telle la forêt de peuplier de Conteville, en Basse-Normandie (d).





D. Gellera

2. LE DÉPÉRISSEMENT DES FORÊTS est plus apparent sur les conifères, tel cet épicéa. Les aiguilles jaunissent et tombent ; les ramures s'étiolent.

Le sol minéral est soumis à l'action des facteurs météorologiques et libère des éléments qui sont soit stockés, soit prélevés par les plantes, soit dissous et entraînés vers les profondeurs par les eaux de pluie, avec des particules fines de matière en décomposition. L'intensité des phénomènes de différenciation morphologique en plusieurs horizons dépend des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, liées à la nature de la roche mère, acide ou basique, filtrante ou imperméable, voire naturellement riche en éléments indésirables (lorsque la forêt recouvre d'anciens sites miniers ou industriels pollués).

La morphologie d'un sol est révélatrice de sa genèse et de sa fertilité, c'est-à-dire de sa capacité à produire du bois. Nous n'aborderons ici que la fertilité minérale, celle que nous avons étudié (voir la figure 3). Elle se compose de la fertilité actuelle, dite fertilité biodisponible, c'est-à-dire des éléments nutritifs directement assimilables par les plantes, et de la fertilité à long terme, c'est-à-dire de la réserve totale en éléments, quelle que soit leur forme chimique. Ces éléments responsables de la fertilité à long terme deviennent biodisponibles par altération des minéraux du sol et par «minéralisation» des matières organiques, lesquelles sont dégradées de façon plus ou moins complète en molécules plus petites, tel le dioxyde de

carbone et l'ammoniac, et en sels minéraux, notamment le potassium et le calcium initialement présents dans le cytoplasme et les parois des cellules végétales. En dehors des apports atmosphériques, la minéralisation des matières organiques est souvent la seule source d'azote, et l'altération minérale celle des cations alcalins (du potassium) et alcalino-terreux (du calcium et du magnésium), indispensables à la croissance des forêts ; nous y reviendrons.

Au XIX^e siècle, les premiers pédologues ont d'abord décrit la morphologie des sols. Puis, ils ont adopté une approche expérimentale pour identifier les mécanismes mis en jeu lors de leur genèse. Dans les sols pauvres (voir la figure 4), tels ceux de la forêt de Fontainebleau, la litière est épaisse. La matière organique s'accumule en surface, car le sol contient peu de micro-organismes capables de la dégrader. La dégradation est alors incomplète et libère des acides, qui attaquent les minéraux. Il ne reste à la surface du sol qu'un «squelette» de quartz blanc cendreuse. Les substances présentes à la surface sont lessivées par l'eau, drainées en profondeur et s'accumulent au-dessus du substrat rocheux où elles forment des horizons bien marqués. Ces sols sont des podzols (ce terme d'origine russe signifie «sous la cendre», en référence à la succession des horizons) et les forêts y poussent mal, produisant peu de bois.

Dans les sols riches (voir la figure 4), les micro-organismes sont nombreux car ils disposent d'une nourriture abondante. L'activité biologique est importante : les matières organiques sont mieux dégradées. Les cations alcalins et alcalino-terreux issus de l'altération des minéraux neutralisent l'acidité des sols. Les oxydes de fer confèrent à ces sols leur couleur uniformément brune. En cas de dégradation, ils perdent leur homogénéité et leur uniformité de couleur, comme nous le verrons plus loin.

Les paramètres de la fertilité

La fertilité du sol évolue avec les variations climatiques, mais surtout avec les activités humaines, présentes et passées. Avant l'apparition de l'agriculture, il y a environ 10 000 ans, le territoire français était presque entièrement boisé, mais l'homme s'est ensuite installé

sur les terres les plus fertiles. Au cours des siècles, la plupart des forêts ont été transformées en terrains agricoles. Ceux de moins bonne qualité ont été abandonnés et sont retournés naturellement à l'état boisé. La majorité de nos forêts de plaine est issue d'anciens terrains agricoles ; en témoigne l'augmentation de la superficie forestière depuis le début du XIX^e siècle : de 8,5 millions d'hectares, elle atteint aujourd'hui 15 millions d'hectares.

De surcroît, les sols forestiers ne sont en général ni amendés, ni travaillés. Dans de nombreux cas, ils ont servi de source d'éléments nutritifs pour les sols agricoles, dans des pratiques tel l'essartage (on brûle le sous-bois et l'on cultive les zones mises à nu) ou le soutrage (on récolte les litières). Par ailleurs, avant l'utilisation massive du charbon, puis du pétrole, pour produire de l'énergie, on faisait un usage intensif du bois, ce qui a ruiné bon nombre de forêts. Ainsi, pour des raisons historiques, les sols forestiers sont plus pauvres que les sols agricoles. Dans ces conditions, les activités humaines risquent de faire basculer leur équilibre d'autant plus facilement qu'il est déjà fragile.

Elles imposent des contraintes au sol de façon directe dans le cas de la sylviculture et de façon indirecte dans le cas de la pollution. Les réserves naturelles, qui ne sont pas exploitées, sont très peu nombreuses et l'intensité du traitement sylvicole que subissent généralement les forêts joue un rôle primordial. On peut classer les forêts exploitées par ordre croissant des contraintes sur le sol. Viennent d'abord les forêts issues de régénération naturelle, où l'exploitation est extensive (on ne prélève que les plus gros arbres), voire semi-intensive (on élimine les espèces concurrentes pour favoriser la croissance des espèces que l'on veut récolter). Puis, viennent les forêts plantées, où les contraintes appliquées au sol sont supérieures, car on introduit souvent une espèce très productive, par exemple le Douglas, un conifère originaire d'Amérique et introduit en France au milieu du XIX^e siècle. Il constitue aujourd'hui la première espèce de reboisement en France, et produit en moyenne 15 mètres cubes de bois par hectare et par an, soit deux fois plus que les feuillus qu'il remplace (ce volume fait référence au bois commercialisé, c'est-à-dire celui des troncs). Les forêts plantées et exploitées semi-intensive-

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 dés herbants 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.