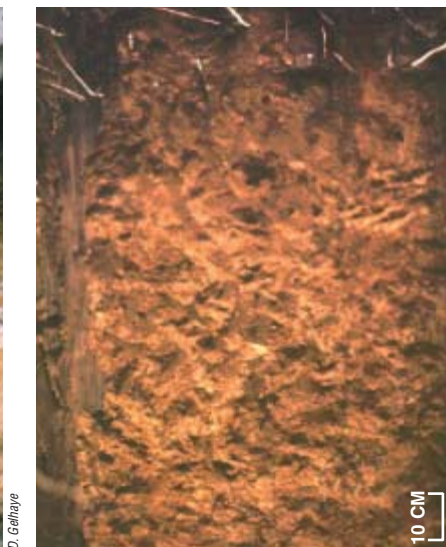




4. DANS LES SOLS PAUVRES (à gauche), tel ce podzol de la forêt de Fontainebleau, la matière organique s'accumule en surface, formant une couche noire. Sa dégradation incomplète libère des acides, qui attaquent les minéraux, de sorte qu'en surface, le sol n'est plus qu'un «squelette» de quartz blanc cendré. 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

puisé dans le sol) : seule une faible part (moins de 10 pour cent) est immobilisée dans les tissus pérennes. Les litières apportent à la surface du sol des éléments puisés dans les profondeurs par les racines. Elles jouent un rôle important dans le maintien de la fertilité des sols acides en réapprovisionnant les couches superficielles. Dans la plantation de Douglas, l'équivalent d'un amendement de 4,5 tonnes de carbonate de calcium est apporté à la surface du sol par les litières pendant la période de révolution.

Pour l'azote, le phosphore, le potassium et le magnésium, seuls 10 à 20 pour cent des besoins annuels sont immobilisés dans la biomasse, de sorte que les réserves du sol ne se consomment que lentement, d'autant plus que l'âge des peuplements augmente. Pour le calcium, le taux de recyclage interne est beaucoup plus faible que pour les éléments précédents, de sorte que les arbres dépendent presque exclusivement des réserves du sol. Ainsi, l'écosystème forestier est vulnérable. Si les réserves sont dilapidées par une mauvaise gestion du patrimoine écologique, les fonctions du sol seront altérées, et les arbres risquent de dépérir.

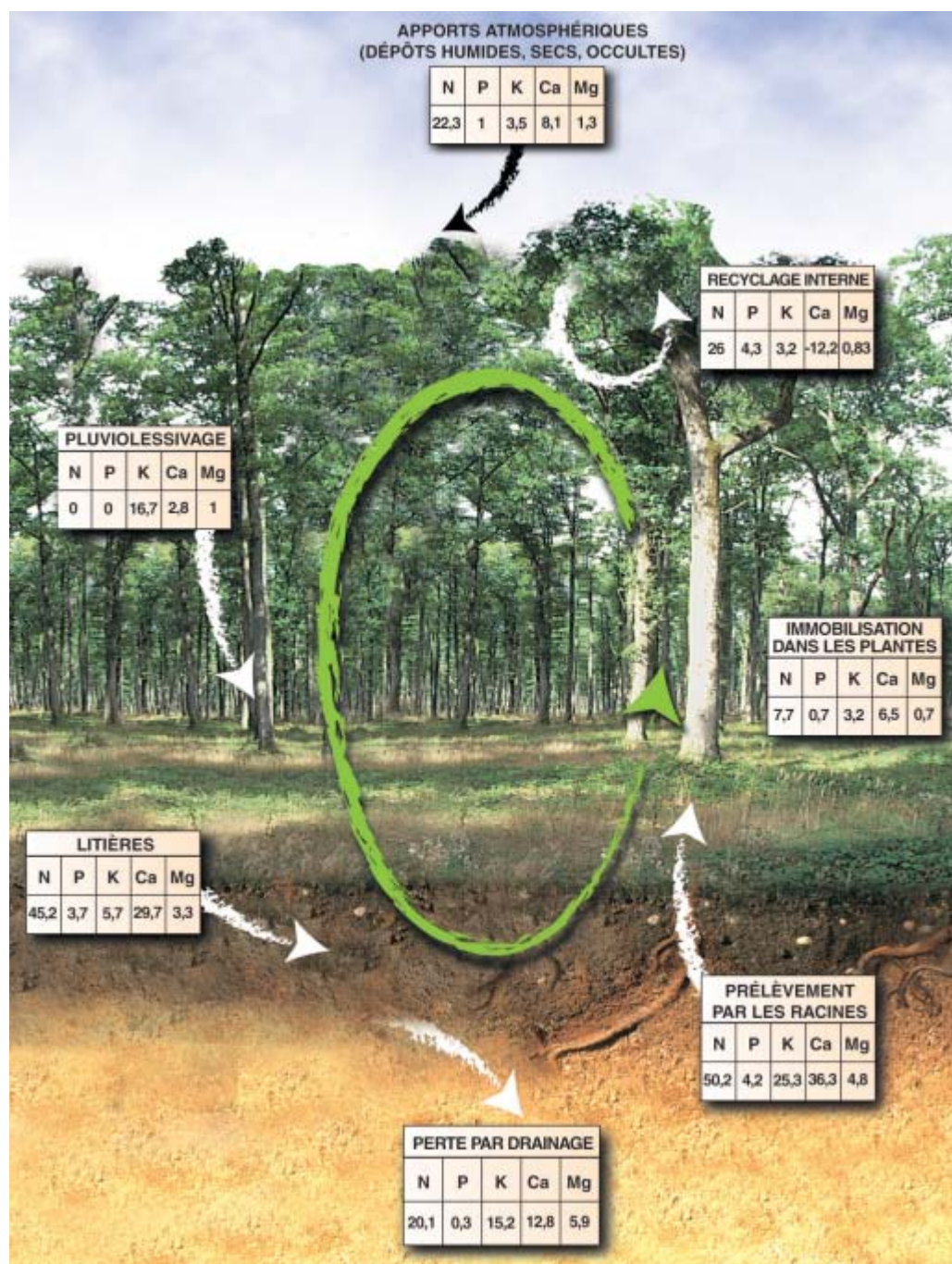
Les bilans d'éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers permettent de suivre l'état de santé des forêts et de détecter des carences, avant même qu'elles ne se manifestent : ils constituent un outil de référence. Grâce à ces bilans, on évalue les conséquences des activités humaines sur les sols forestiers.

Nous calculons ces bilans pour une saison ou pour quelques années, c'est-à-dire pour une période correspondant à un stade de développement donné des plantes (on parle de bilan courant annuel), ou encore pour l'ensemble d'une révolution (on parle de bilan moyen annuel). En France, nous avons étudié quelques exemples dont la forêt d'Aubure, dans les Vosges, constituée d'épicéas de 80 ans dépérissant sur un sol très acide, et la forêt de Douglas, plus jeune (de 60 ans environ) et saine, qui pousse sur le sol acide de Vauxrenard (dans le Beaujolais). Dans les deux cas, les apports atmosphériques sont élevés et ont augmenté avec l'âge des forêts. Notamment, les apports d'azote sont de 15 à 20 kilogrammes par hectare et par an. Le flux d'éléments issus de l'altération des minéraux du sol est très faible, pour le calcium et pour le magnésium (environ un kilogramme par hectare et par an) ; il est un peu plus élevé pour le

potassium (dix kilogrammes par hectare et par an).

La demande en éléments nutritifs diminue à mesure que les arbres croissent : les Douglas poussent beaucoup durant les premières années, mais leur croissance – et en même temps la demande nutritive – ralentit avec l'âge. Le scénario est voisin pour l'épicéa, avec une vitesse d'accroissement un peu plus lente et des besoins nutritifs

légèrement inférieurs. En revanche, les quantités d'éléments nutritifs qui sortent de l'écosystème par drainage sont très différentes. Statistiquement, dans les sols qui étaient encore cultivés il y a un ou deux siècles, on observe une production importante d'acide nitrique dans le sol, probablement due à des germes nitrificateurs apportés par les lisiers. C'est le cas à Vauxrenard, où les pertes par drainage sont fortes



5. LES ÉLÉMENTS MINÉRAUX CIRCULENT EN PERMANENCE entre les différentes parties d'un écosystème forestier. C'est le cas de l'azote (N), du phosphore (P), du potassium (Ca) et du magnésium (Mg) (dans les tableaux, les nombres exprimés en kilogrammes par hectare et par an indiquent les quantités d'éléments échangés). Ils passent du sol à la plante, par prélèvement des racines, à l'intérieur de la plante, par un recyclage interne, et de la plante au sol, par les litières. L'écosystème est ouvert sur l'extérieur par les apports atmosphériques et par les pertes par drainage vers les nappes phréatiques et vers les eaux de surface.

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. Gailhaguet

6. SUR LES ÉPICÉAS DÉPÉRISSANT 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.