

modules qui auraient évolué indépendamment de lui.

Les difficultés du projet *Robokoneko* posent la question des limites de la robotique évolutionniste : à quel degré de complexité des problèmes peut-on s'attaquer avec succès ? Aujourd'hui, les comportements accessibles à cette discipline mettent en œuvre de simples réflexes qui permettent de marcher, nager, voler, éviter des obstacles, ou poursuivre un objet. En revanche, l'évolution de comportements plus élaborés, tels ceux qui nécessitent de la mémoire, des représentations de l'environnement ou une planification, pose des difficultés conceptuelles, méthodologiques et techniques dont on ignore encore si l'on saura toutes les résoudre.

Comprendre et exploiter les synergies que la nature met en œuvre lorsqu'elle associe l'évolution de l'espèce au développement et à l'apprentissage de l'individu est un autre défi de la robotique évolutionniste. À terme, grâce à des mécanismes équivalents, les robots seront non seulement adaptés aux caractéristiques de leur environnement qui changent lentement, mais aussi adaptables à des caractéristiques qui changent rapidement. De tels robots « survivront » et continueront leur mission, même en cas de panne de leurs récepteurs ou de leurs actionneurs, en cas de destruction d'une partie de leur système de commande ou en cas de transfert dans un environnement nouveau. L'évolution est en marche.

Jean-Arcady MEYER est Directeur de recherches au CNRS. Agnès GUILLOT est Maître de conférences à l'Université Paris X-Nanterre. Ils mènent leurs recherches à l'*AnimatLab* du Laboratoire d'informatique de Paris 6 (LIP6).

S. NOLFI et D. FLOREANO, *Evolutionary Robotics. The Biology, Intelligence, and Technology of self-Organizing Machines*, The MIT Press / Bradford Books, 2000.

T. GOMI, *Evolutionary Robotics. From Intelligent Robots to Artificial Life*, vol. I et II, AAI Books, 1998.

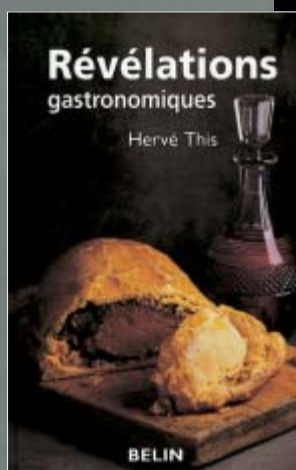
J.-A. MEYER, P. HUSBANDS et I. HARVEY, *Evolutionary Robotics : a Survey of Applications and Problems*, dans P. HUSBANDS et J.-A. MEYER, *Proceedings of The First European Workshop on Evolutionary Robotics -EvoRobot'98*, Springer Verlag, 1998.

## Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



### LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant la physique des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie ses études des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



### RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, par des analyses physico-chimiques des aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

**Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.**

### LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



**BELIN**

**Voir bon de commande page 98**

# Les besoins nutritifs des forêts

**JACQUES RANGER**

*Périodiquement, les forêts dépérissent. Toutefois, une connaissance plus précise de leurs besoins nutritifs devrait aider à réduire le nombre de ces épisodes et améliorer leur «état de santé», malgré la pollution et les variations du climat.*

**D**ans les années 1980, les forêts ont dépéri, surtout dans l'Est de la France, révélant la fragilité des écosystèmes forestiers. Les aiguilles des conifères jaunissaient, certaines tombaient et les cimes s'étio- laient. Ce dépérissement a été attribué à tort aux seules pluies acides. Aux fac- teurs qui fragilisent habituellement

l'écosystème forestier, c'est-à-dire la pauvreté des sols et une sylviculture inadaptée, se sont ajoutées les séche- resses de 1976 et du début des années 1980, ainsi qu'une pollution atmo- sphérique accrue. Le jaunissement des aiguilles est dû à une carence en magné- sium, et la défoliation à un manque d'eau (voir la figure 2).

Les forêts malades ont marqué les esprits, probablement parce que leur dépérissement est survenu au moment où la conscience écologique de la société s'aiguissait. Pourtant, le phénomène est chronique. En 1792, on signalait déjà un dépérissement de l'orme vers Tou- louse, à la suite d'une sécheresse et d'une attaque de scolytes, des insectes



J. Ranger



R. Camla

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<sup>e</sup> 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. Gellhaye

**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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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 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.

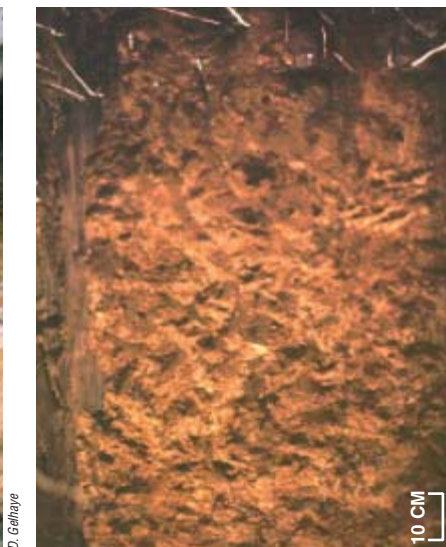
Pour compenser la perte de production liée à la dégradation de la fertilité des sols, on introduit souvent de

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

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.

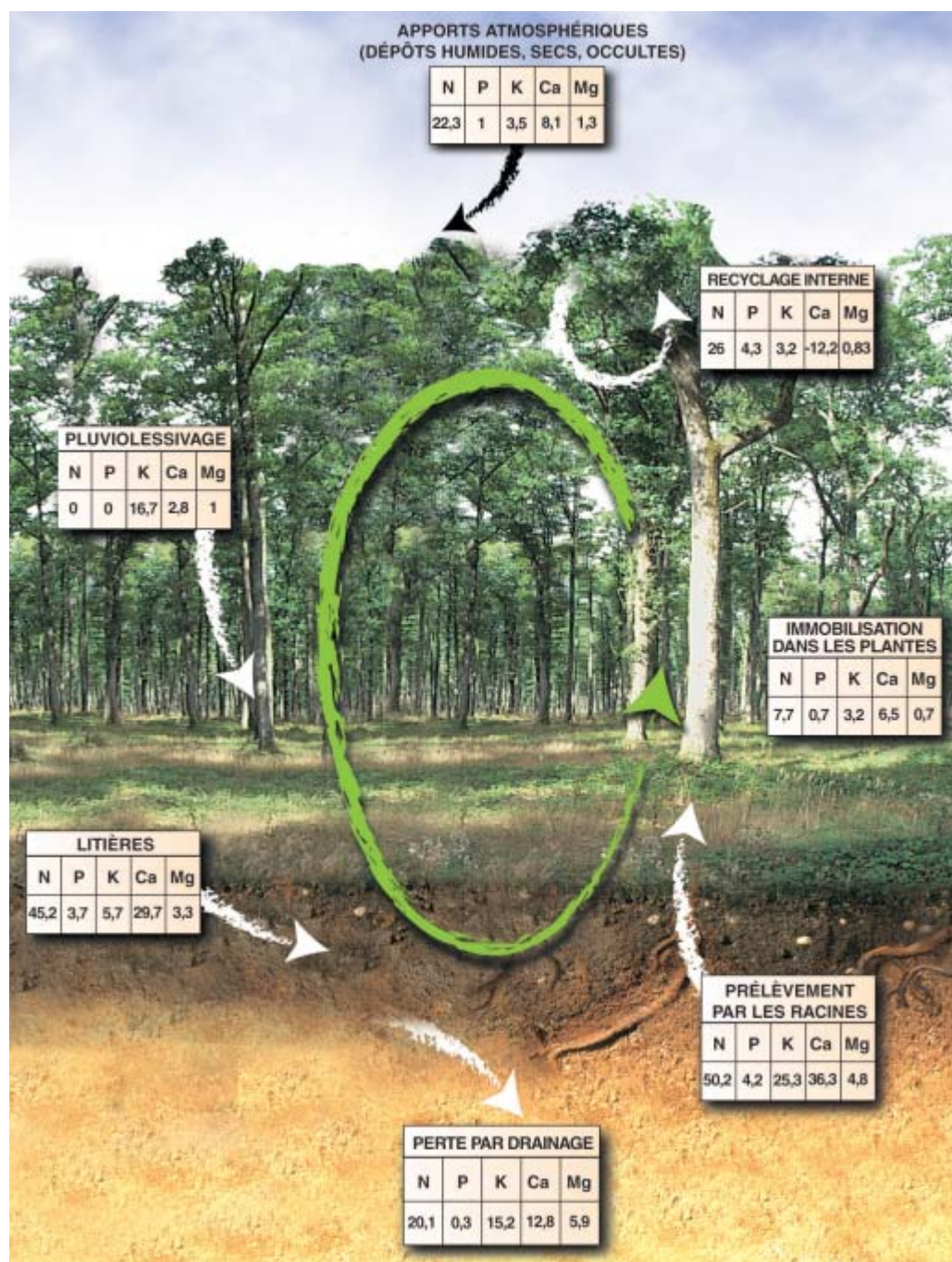
Les bilans d'éléments nutritifs dans les écosystèmes forestiers permettent de suivre l'état de santé des forêts et de déceler des carences, avant même qu'elles ne se manifestent : ils constituent un outil de référence. Grâce à ces bilans, on évalue les conséquences des activités humaines sur les sols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

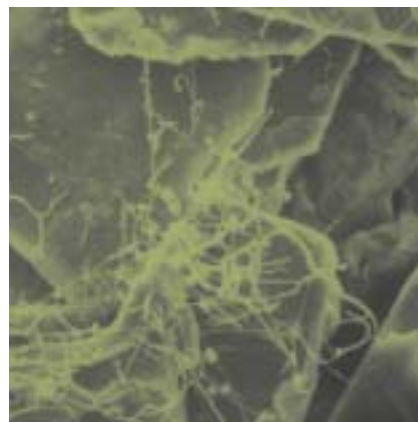
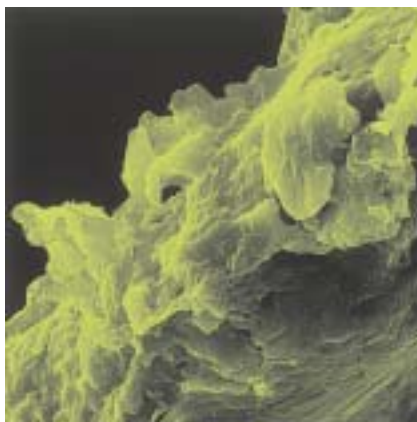
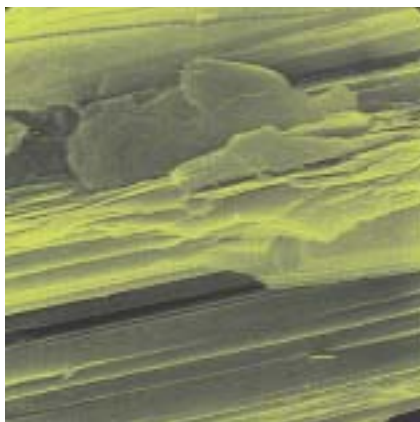
Grâce à cette méthode des minéraux test, nous avons identifié l'évolution actuelle des sols sous l'influence de la sylviculture. Notamment, nous avons classé les essences en fonction du degré d'acidité qu'elles confèrent aux sols sur lesquels elles poussent. Ainsi, l'épicéa commun acidifie plus les sols 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 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 les 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.*

