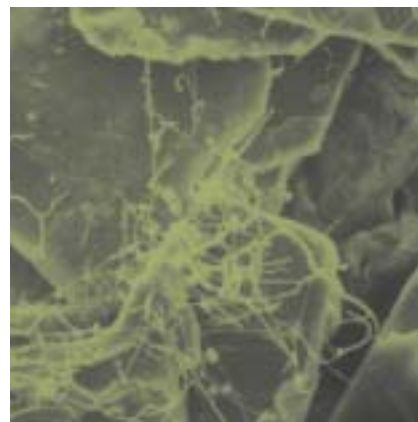
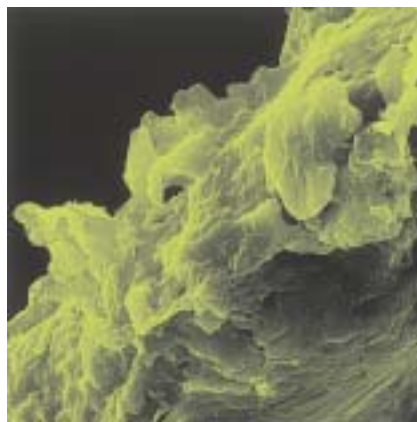
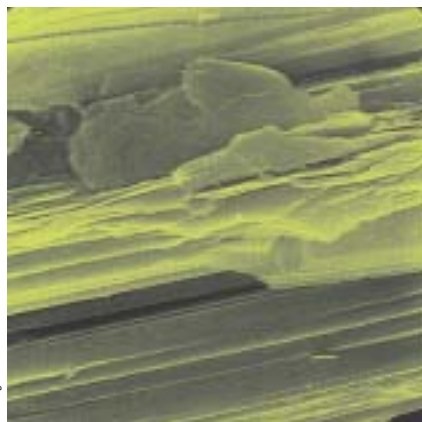




7. LES MINÉRAUX TEST sont des silicates à structure lamellaire semblables à du mica, que l'on introduit dans le sol et que l'on y laisse séjourner pendant quelques années avant d'étudier les composés qui se fixent entre les feuillets et qui sont des indicateurs d'une évolution vers un sol brun ou vers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

La vie intérieure du proton

ROBERT KLANNER

Supermicroscope électronique, le collisionneur HERA, révèle la structure interne du proton, notamment la mer de quarks et de gluons que renferme cette particule.

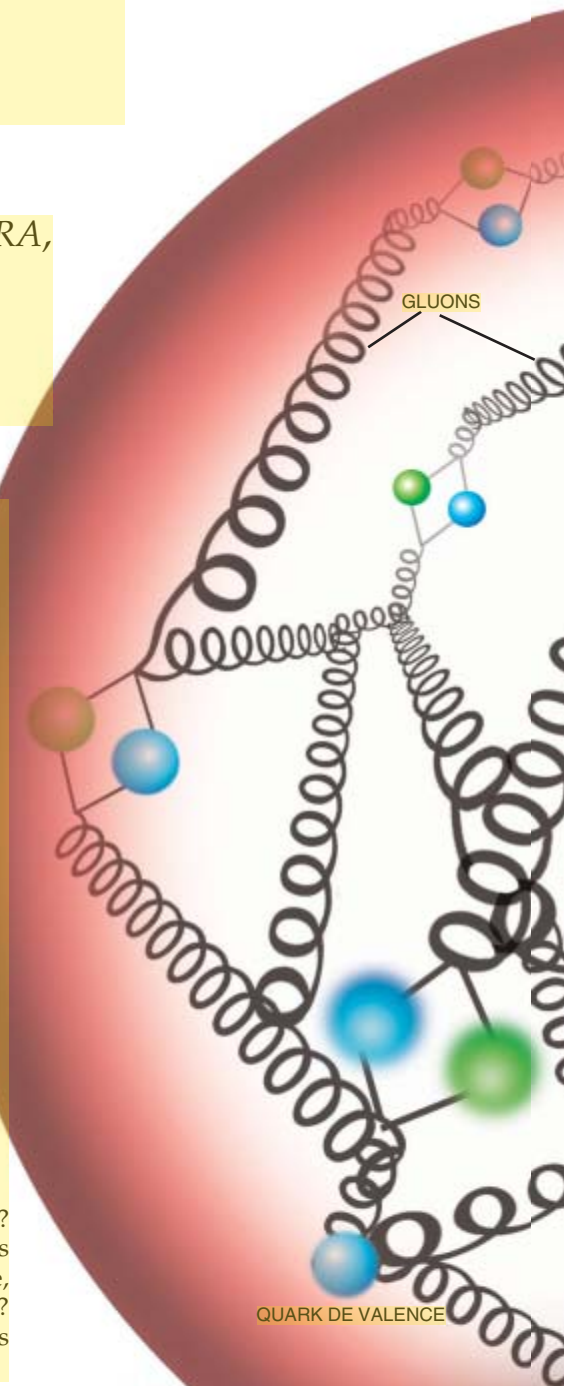
Quatre interactions fondamentales régissent l'Univers : la gravitation, l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte. Les forces de gravitation font tomber les pommes des arbres et tourner la Terre autour du Soleil. Les forces électromagnétiques lient les électrons chargés négativement à des noyaux positifs pour former des atomes ; elles créent aussi le courant électrique. L'interaction faible est à l'œuvre dans les réactions nucléaires qui fournissent au Soleil sa chaleur et son rayonnement. L'interaction forte, enfin, lie les constituants élémentaires de la matière les uns aux autres : elle associe des particules ponctuelles – les quarks – pour former les protons et les neutrons, et empêche que la répulsion électromagnétique entre protons ne fasse éclater les noyaux.

Chaque jour, nous sommes confrontés aux effets de la gravitation. En revanche, cette interaction ne joue qu'un rôle insignifiant dans la physique des particules. Aux échelles subatomiques auxquelles les particules interagissent, la gravitation est notablement plus faible que les trois autres interactions.

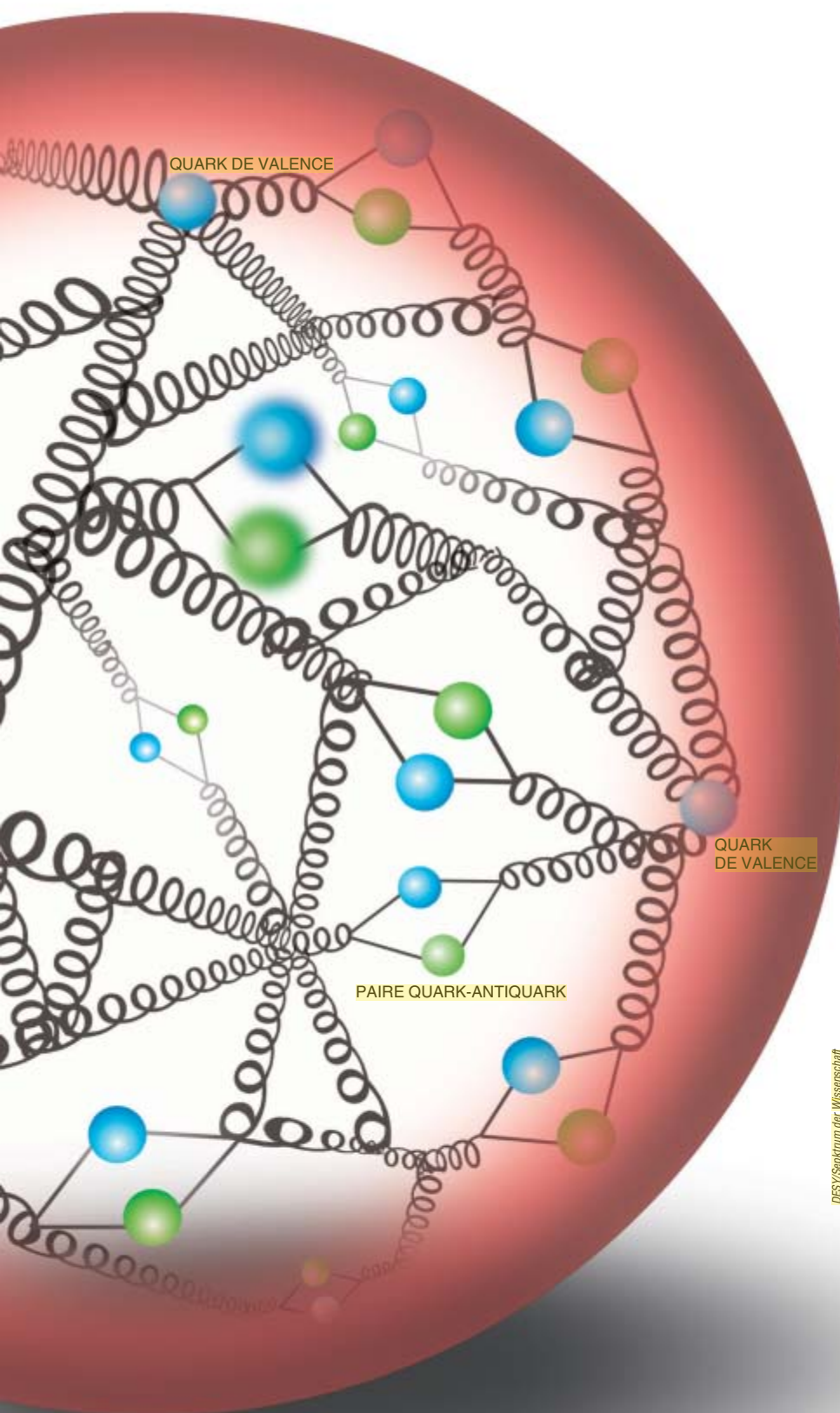
Les physiciens ont ordonné et résumé dans une théorie, dénommée modèle standard, l'ensemble des données recueillies sur les trois autres interactions. Le modèle standard décrit toutes les interactions entre particules élémentaires et tous les phénomènes qui mettent en jeu des forces

électromagnétiques, faibles ou fortes (voir l'encadré de la page 92). Depuis 30 ans, le modèle standard résiste à tous ceux qui ont tenté de le mettre en défaut : toutes les expériences réalisées jusqu'ici confirment sa validité. S'agit-il pour autant de la «théorie ultime»? Les physiciens pensent que non. Si l'on comprend bien l'interaction électromagnétique et l'interaction faible dans le cadre de cette théorie, l'interaction forte soulève encore nombre de questions. De quelle façon quarks et gluons s'associent-ils au sein d'un proton? Comment l'interaction forte dépend-elle de la distance entre particules en présence? Pourquoi ne peut-on observer un quark ou un gluon séparément, mais seulement au sein de particules plus grosses, tel un proton ou un neutron? Les quatre interactions fondamentales ont-elles bien une origine commune, comme le supposent les physiciens? Quelle théorie unique pourrait les décrire toutes les quatre?

Grâce aux expériences de collision entre particules, notamment celles qui se poursuivent depuis huit ans au collisionneur HERA, les physiciens ont déjà des éléments de réponse. HERA est l'acronyme allemand de *Hadron Elektron Ring Anlage*, c'est-à-dire l'anneau collisionneur pour électrons et hadrons. L'électron est, comme le muon, le tau et trois neutrinos, un



1. À L'INTÉRIEUR D'UN PROTON : les trois «quarks de valence» constitutifs du proton, échangent sans cesse des gluons (représentés par les ressorts) qui les lient. L'espace d'un instant, un gluon peut se transformer, en une paire constituée d'un quark et d'un antiquark. Un proton contient donc en permanence une «mer» bouillonnante de gluons et de paires virtuelles de quarks-antiquarks.



lepton. Ce type de particule participe aux interactions électromagnétiques et aux interactions faibles. Les hadrons sont des particules massives constituées de groupes de trois ou de deux quarks. Il existe en tout six quarks différents, qui participent à toutes les interactions.

L'accélérateur HERA est le plus grand de ceux qui équipent le centre de recherches DESY, à Hambourg. L'ensemble est constitué de deux anneaux où les particules sont accélérées. D'une circonférence de 6 336 mètres, chacun d'eux est enfoui à 30 mètres sous la ville. Le premier anneau accélère des électrons jusqu'à ce que leur énergie cinétique atteigne 27,5 giga-électronvolts, soit 27,5 milliards d'électronvolts (un électronvolt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel égale à un volt). Le second anneau confère aux protons une énergie cinétique de 920 giga-électronvolts. Ainsi accélérés, les électrons et les protons des deux anneaux circulent en sens inverses pendant des heures. Ils finissent par atteindre une vitesse proche de la vitesse de la lumière, et tournoient à 47 000 tours par seconde juste avant d'être précipités les uns contre les autres ! Les collisions ont lieu dans les grandes salles d'expérience où se trouvent les détecteurs H1 et Zeus. Pesant plusieurs milliers de tonnes, hauts comme une maison, ils ont été conçus pour enregistrer les collisions et toutes les traces des particules qui en sont issues. Des milliers de tels «événements» sont traités par ces détecteurs. Seuls les plus intéressants sont sélectionnés et conservés pour un examen approfondi.

HERA fonctionne depuis 1992. Près de 400 physiciens de 12 pays participent en permanence aux expériences en cours. Chaque collision produit d'abondantes données, et les physiciens qui analysent les résultats doivent passer au crible des centaines de milliards d'octets. Ils n'auraient aucune chance d'y parvenir s'ils ne disposaient de procédures automatiques. Cela sera encore plus nécessaire à l'avenir, puisque les travaux en cours sur l'accélérateur multiplieront le nombre d'événements enregistrés par cinq. La reprise des expériences est prévue pour l'automne 2001.

HERA est le premier et le seul collisionneur conçu pour que des particules aussi différentes que des protons et

DESY/Spektrum der Wissenschaft