

Extinction fulgurante

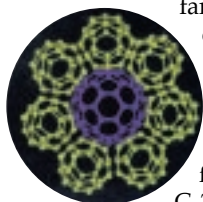
Il y a 252 millions d'années, à la fin du Permien, 85 pour cent des espèces océaniques et 70 pour cent des vertébrés terrestres ont disparu. L'extermination a été rapide : elle n'a duré qu'un million d'années. Pour établir cette durée, Douglas Erwin du Musée américain d'histoire naturelle, a daté le zircon créé dans les roches volcaniques appartenant aux niveaux de la fin du Permien où les espèces disparaissent. Le zircon incorpore de l'uranium lors de sa formation, et le dosage des produits de désintégration indique l'âge du minéral. Ces mesures intéressent les paléontologues qui s'interrogent sur les possibilités d'évolution des animaux lors de ces crises, possibilités réduites si la cause de l'extinction est brève (type chute de météorite), réelles si la cause est plus étalée dans le temps (type éruption volcanique).

Oasis des glaces

Des organismes vivants ont été découverts dans la couverture de trois à six mètres de glace de lacs de l'Antarctique, dans l'un des déserts les plus froids et les plus secs sur Terre. Du sable et des graviers, colonisés par des communautés microbiennes, sont apportés par le vent et piégés dans des fissures de la glace. Au plus chaud de l'été, la partie supérieure de la glace fond, et ces agrégats denses de sédiments et de bactéries s'enfoncent jusqu'à la couche solide. Quand la surface gèle à nouveau, ces agrégats sont pris dans la glace, mais les sédiments sombres absorbent l'énergie solaire et fondent la glace environnante, formant des poches d'eau où survivent les communautés microbiennes pendant plusieurs mois.

C 36, fullerène prometteur

La molécule C 36 (en vert) vient d'être synthétisée et isolée par des chercheurs américains : c'est la petite dernière de la famille des fullerènes, ces molécules en forme de cages composées uniquement d'atomes de carbone. Depuis sa découverte, en 1990, on a beaucoup étudié C 60 (en violet), en forme de ballon de football. C 36 est plus réactif que son grand frère, et s'associe plus facilement avec d'autres atomes. On pense ainsi que C 36, dopé par du rubidium, devient supraconducteur à température plus élevée que C 60 (-242 °C).



Le jeu des quatre coins

La solution existait ; elle est maintenant construite.

Aux yeux du public et de quelques scientifiques, les mathématiques sont dépréciées par l'artificialité des problèmes posés. Pourtant, il est à peu près certain que les problèmes d'apparence futile auront dans le futur des applications pratiques. Toujours est-il qu'aujourd'hui, les mathématiques ludiques sont une branche des mathématiques appliquées.

Le problème des quatre coins est de ce type : comment remplir un quadrillage 10×10 avec trois couleurs (rouge, blanc et vert), de manière qu'aucun rectangle (quelle que soit sa taille) n'ait quatre coins de la même couleur. Nous baptiserons RCP ces quadrillages. M. Beresin, E. Levine et J. Winn ont montré, en 1989, que de tels quadrillages existent, mais sans donner de méthode pour en construire. Jerome Lewis nous en propose une.

Tout d'abord, remarque-t-il, la probabilité d'avoir des rectangles aux coins de la même couleur augmente avec le nombre de cases de cette couleur, aussi pense-t-il raisonnable d'utiliser, autant que possible, le même nombre de cases de chaque couleur et postule aussi que les chances de réussite seront maximales avec au moins 3 cases de chaque couleur dans chaque rangée et colonne.

Le remplissage s'effectue colonne par colonne, chacune ayant ses cases numérotées de 1 à 10. La première étape consiste à mettre trois cases rouges dans la première colonne. Pour cela on établit la liste des 120 combinaisons de trois chiffres ordonnés parmi 10 : 1-2-3, 1-2-4, 1-2-5, 1-2-6, ..., 7-8-9, 7-8-10, 7-9-10 et 8-9-10 ; on choisit un de ces tri-

plets, qui détermine la place des cases rouges de la première colonne. Tous les triplets des autres colonnes qui donnent un rectangle avec deux coins rouges, c'est-à-dire qui ont au moins deux chiffres en commun avec un autre triplet, sont mis à l'écart. Pour la colonne suivante, un second triplet est choisi parmi les triplets autorisés, et ainsi de suite jusqu'à la colonne 10. Les 4 cases rouges manquantes sont ensuite placées par essais et erreurs.

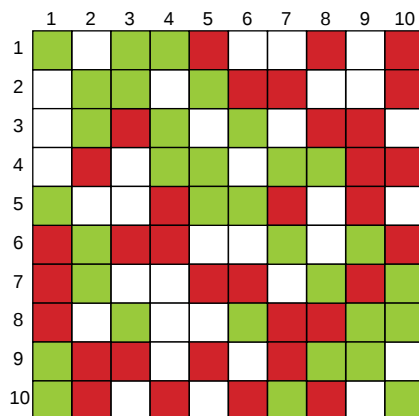
La deuxième étape permet de placer les cases blanches et donc les cases vertes. Pour cela, J. Lewis construit une matrice à 120 lignes et 10 colonnes. Chaque ligne correspond à un des triplets possibles, chaque colonne de la matrice correspond à la colonne de même rang du quadrillage. On place un 0 dans les cases correspondant à un triplet de cases blanches compatible avec l'emplacement des cases rouges (c'est-à-dire sans chiffre commun). Le placement des cases blanches de la première colonne est donné par le premier zéro de cette colonne rencontré ; chaque triplet incompatible des 9 autres colonnes est alors écarté (deux chiffres en commun) et marqué par un «1». Passons à la colonne 2 et recherchons, dans la matrice, le premier zéro pour la place des cases blanches, mais n'oublions pas de vérifier qu'aucun rectangle aux coins verts n'a été créé ; en ce cas, il nous faut opter pour un autre zéro. Marquons maintenant dans les colonnes 3 à 10, les triplets incompatibles avec cette deuxième colonne par un «2» et réitérons la procédure pour les autres colonnes.

En cas d'impasse, c'est-à-dire plus aucun zéro dans une colonne matrice, il est nécessaire de remonter jusqu'au zéro pris en compte dans la colonne précédente, et tenter le suivant, jusqu'à pouvoir remplir la colonne 10. La démarche par essais et erreurs s'apparente à celle employée dans un labyrinthe : si vous débouchez dans un cul-de-sac, vous revenez à la dernière bifurcation et tentez une autre voie jusqu'à trouver la sortie.

Un ordinateur moyen mettra une dizaine de minutes pour produire cette figure. Contrairement à ce qui était attendu, on obtient un quadrillage à 34, 34 et 32 cases respectivement rouges, blanches et vertes et non un 34, 33 et 33. Ces derniers sont-ils inexistant, seulement rares, ou bien cette méthode ne permet-elle pas de les obtenir ? Il est impossible de répondre à l'heure actuelle.

Remarquons enfin qu'à partir d'un quadrillage-RCP, on peut, par permutation de colonnes, de rangées, par rotation et réflexion, en obtenir de multiples. L'ensemble de ces quadrillages obtenus à partir d'un peut constituer une classe. Combien existe-t-il de classes ? Mystère.

Loïc MANGIN



Quadrillage-RCP avec 34 cases rouges, 34 cases blanches, et 32 cases vertes.

Foies fractals

La géométrie fractale vient à la rescousse de l'imagerie médicale.

Pour visualiser l'intérieur d'un foie avant de l'opérer, des chercheurs ont mis au point des algorithmes de reconstruction de la structure des vaisseaux sanguins hépatiques, qui complètent les données des scanners. Ces algorithmes sont fondés sur la structure fractale de la vascularisation du foie.

En effet, le foie est irrigué par des vaisseaux sanguins qui, à la manière d'un chêne ou d'un réseau fluvial, présentent une structure en arbre : les ramifications, de plus en plus petites et nombreuses, se répètent à l'identique d'une génération à l'autre (cette propriété est nommée l'auto-similarité). Grâce à cette structure dite fractale, les arborescences de feuilles, de fleuves ou de vaisseaux sanguins s'approchent très près de n'importe quel point d'un grand volume, sans remplir complètement celui-ci.

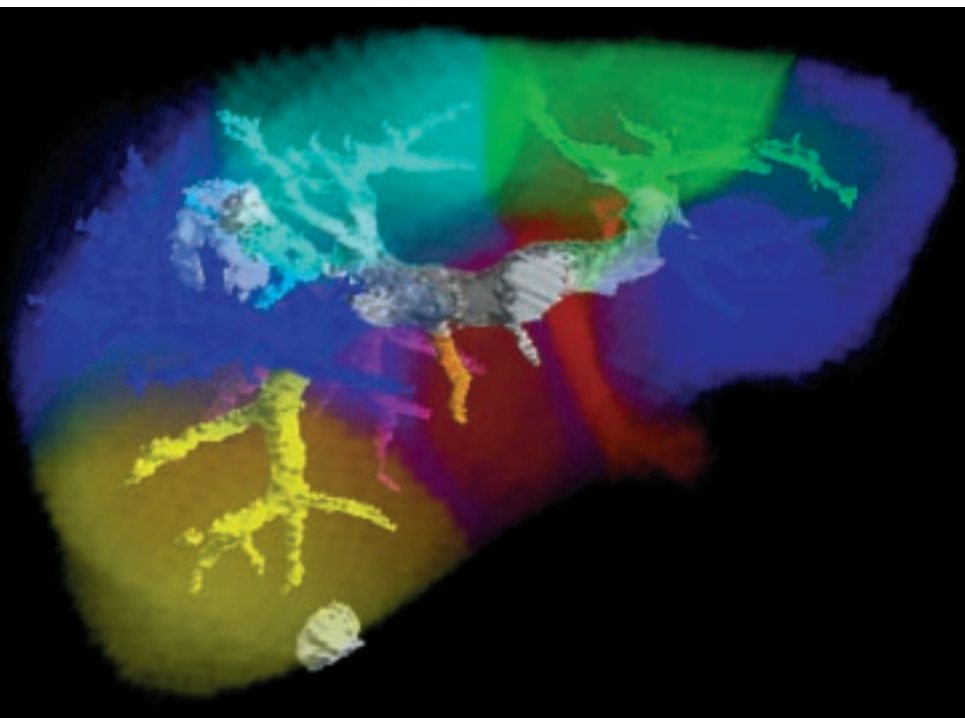
Un chirurgien, qui ôte une tumeur, sectionne certaines branches de l'arbre :

les ramifications en aval ne sont alors plus alimentées et n'irriguent plus les tissus alentour. Ainsi, si on ne retire pas entièrement ces tissus, ils meurent après l'opération et handicapent le patient. On ne doit cependant pas couper plus que nécessaire.

Si le chirurgien savait quels vaisseaux irriguent la tumeur, il pourrait visualiser les segments irrigués par ces vaisseaux en injectant un colorant dans ceux-ci ; mais il ne peut déterminer directement les vaisseaux concernés, car les parties du foie correspondant aux différentes branches sont trop enchevêtrées. Il faut donc faire cette détermination avant l'opération, pour chaque patient (car la structure des vaisseaux diffère énormément d'un individu à l'autre).

Pour visualiser en trois dimensions l'intérieur d'une partie du corps, les médecins disposent de la tomographie informatisée (utilisation de scanners). Malheureusement, pour le foie, cette technique ne fournit qu'une information partielle, car la résolution des images ne permet de voir que les plus gros vaisseaux, jusqu'à la troisième «génération» de ramifications environ.

On connaît ainsi la souche et les plus grosses branches : comment compléter l'arbre ? Si on savait selon quels principes l'arbre des vaisseaux du foie



Subdivision d'un foie en segments. Les branches issues de la veine porte, localisées par tomographie informatisée, sont matérialisées par des teintes opaques. Chaque segment est représenté en transparence, dans la couleur de la branche qui l'irrigue. Deux petites tumeurs sont visibles (au bord inférieur du segment jaune, ainsi qu'à la limite entre les segments bleu et turquoise), dont la position et l'extension ont été déterminées à l'aide d'un autre procédé de segmentation.

**CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (CNRS)**

**INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES APPLIQUEES
DE TOULOUSE (INSA)**

**UNIVERSITE PAUL SABATIER
DE TOULOUSE (UPS)**

**APPEL
A CANDIDATURES**

**DIRECTEUR
DU SERVICE NATIONAL
DES CHAMPS MAGNETIQUES
PULSES**

Niveau : Directeur de recherche
1ère classe

Localisation : TOULOUSE

Début du contrat :

Fin 1999-Début 2000

Le Service National des Champs Magnétiques Pulsés, situé à Toulouse, est un des centres d'excellence de recherche en physique sur les champs magnétiques intenses. Une très grande installation de 12 MJ à la pointe technique sur les champs magnétiques intenses pulsés sera opérationnelle d'ici fin 1998.

Le Directeur est responsable du programme scientifique et du développement technique du Service.

Les candidats devront être spécialistes en physique de la matière condensée expérimentale et avoir au moins 10 ans d'expérience dans la recherche. Ils devront avoir travaillé dans le domaine des champs magnétiques intenses. Une expérience de direction et des connaissances d'ingénierie électrique seraient appréciées.

Informations : Direction du département Sciences Physiques et Mathématiques (CNRS)

Par e-mail : spm-direction@cnrs-dir.fr

ou téléphone : 01.44.96.42.50

Candidatures par courrier en joignant deux exemplaires du CV à :

CNRS

Département des Sciences Physiques et Mathématiques

3, rue Michel-Ange

75794 Paris cedex 16



FESTIVAL INTERNATIONAL DU CIEL ET DE L'ESPACE

Le 8^{ème} Festival international du ciel et de l'espace de Fleurance, parrainé par Hubert Reeves, se déroulera du 1^{er} au 8 août.

Il propose un arrêt sur les extraordinaires découvertes réalisées ces dernières années sur les planètes. Programmes d'exploration du Système solaire, traces d'eau sur la Lune, soupçon de vie sur Mars, nouvelles planètes autour d'autres étoiles, autant de découvertes qui nous apprennent beaucoup sur notre propre histoire et modifient notre vision de l'Univers.

- Un cycle de conférences sur le thème des planètes et de la vie avec des astrophysiciens et des biologistes.
- Des cours, stages pratiques et ateliers pour découvrir et pratiquer l'astronomie.
- Des animations tous publics (micro-fusées, cadrans solaires, observations, etc.)
- De merveilleuses veillées aux étoiles musicales sous le ciel de Gascogne.
- Des expositions.

Renseignements et réservations :

60 bis, rue Gambetta
32500 Fleurance

Tél. : 05 62 06 62 76

Fax : 05 62 06 24 99

E. mail :

Etoiles.Fleurance@mipnet.fr

croît, au stade de l'embryon et au-delà, on pourrait effectuer des simulations numériques afin de reconstruire, pour chaque patient, le reste de l'arbre. Mais on ne connaît pas ces principes ; aussi utilise-t-on les principes de croissance des fractals.

Heinz-Otto Peitgen et ses collègues, du Centre de diagnostic médical et d'imagerie de l'Université de Brême, font l'hypothèse que la structure en arbre des vaisseaux du foie, depuis la souche de cet arbre jusqu'à la périphérie du foie, est semblable à celle d'une décharge électrique entre une électrode centrale et une électrode périphérique entourant un isolant. L'équipe de Brême a effectué des simulations numériques utilisant l'équation mathématique correspondante, une équation différentielle de Laplace. Celle-ci décrit la diffusion d'un grand nombre de particules dans un milieu hétérogène, sous l'effet d'un champ : individuellement, les particules se déplacent au hasard jusqu'à ce qu'elles rencontrent la souche ou l'une des branches déjà construites, puis y restent collées.

Ce processus, nommé agrégation limitée par diffusion (en anglais *diffu-*

sion-limited aggregation, ou DLA), est l'un des mécanismes de croissance fractale les plus fréquents dans la nature inanimée : cristaux de glace, décharges électriques, électrolyse, etc.

L'analogie entre ce type de croissance fractale et la croissance des vaisseaux sanguins hépatiques est pour l'instant purement spéculative. L'équipe de Brême a néanmoins réussi, grâce aux simulations fondées sur cette analogie, à localiser très précisément les différents segments de foies humains destinés aux expériences. La mise en œuvre clinique du procédé a démarré. Déjà, des chirurgiens de l'Université de Hanovre utilisent l'algorithme de reconstruction pour connaître, avant une opération du foie, la position des vaisseaux irriguant la tumeur.

Peut-on en conclure, inversement, que l'agrégation limitée par diffusion soit un principe fondamental de la croissance des vaisseaux sanguins ? Il semble que non : le groupe de H. Peitgen a essayé également un procédé mathématique plus simple, qui associe à chaque point du foie la branche la plus proche, et les résultats sont aussi bons.

Christoph POPPE

Sursauts lointains

Nouveaux sursauts, nouvelles hypothèses.

A chaque nouvelle observation astronomique à la une des journaux, les médias clament la remise en cause des théories existantes. Le domaine des sursauts gamma est l'un des rares où cette prétention est justifiée. En 1991, la théorie selon laquelle ces brefs éclairs de rayonnements gamma proviennent du disque de notre Galaxie s'est effondrée : l'instrument *BATSE*, à bord de l'*Observatoire Compton* a montré que les sursauts se répartissaient uniformément sur la voûte céleste, et non le long du plan galactique.

Une autre hypothèse, selon laquelle les sursauts se produisent dans un halo sphérique entourant notre Galaxie, a été balayée en 1997, lorsque la première mesure de distance d'un sursaut le plaça beaucoup trop loin. Bien que les astronomes s'entendent aujourd'hui pour dire que les sursauts sont des sortes d'explosions géantes qui émanent de galaxies lointaines, leur origine demeure l'un des grands mystères de l'astronomie.

Les astronomes ont mesuré récemment la distance de deux nouveaux sur-

sauts. Le premier, enregistré le 14 décembre 1997 par le satellite italien *Beppo-Sax*, émane d'une galaxie distante de 12 milliards d'années-lumière. La luminosité enregistrée était si grande que, situé à une telle distance, ce sursaut est l'événement cosmique le plus énergétique jamais observé depuis le Big Bang.

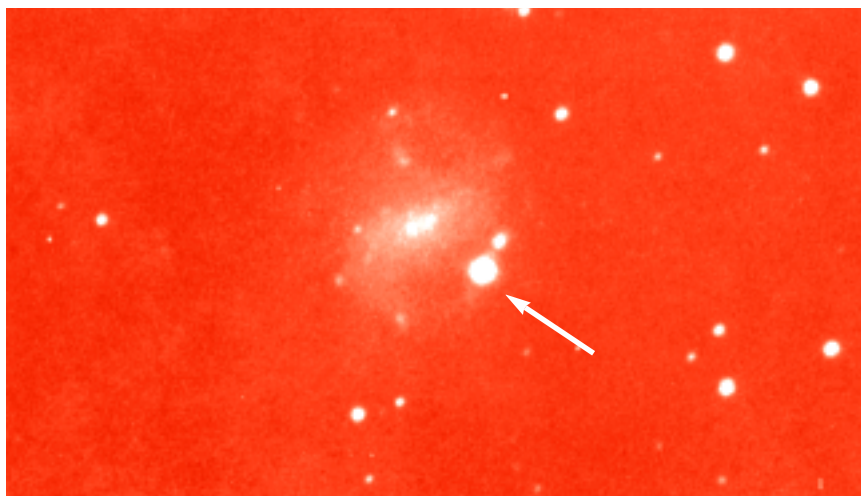
Alors que les astronomes s'accordaient sur la distance et la luminosité incroyables de ce sursaut, le satellite *Beppo-Sax* enregistra le 25 avril 1998, un sursaut 100 fois plus proche et 100 000 fois moins brillant que le sursaut de décembre. Pour ajouter à la confusion, ce dernier fut suivi, non par l'émission rémanente habituelle, mais par une supernova. C'était la première fois qu'un sursaut gamma et une supernova étaient associés. Là encore, il ne s'agissait pas d'une supernova ordinaire : sa luminosité a diminué plus lentement que celles des supernovae aux caractéristiques spectrales identiques, et elle a émis plus d'énergie dans le domaine radio que toutes les supernovae connues.

Dans une supernova, l'énergie provient de l'explosion thermonucléaire d'une petite étoile, nommée naine blanche, ou de l'implosion d'une étoile massive. Toutefois, ces événements n'engendrent pas de sursauts gamma, car les couches externes de la supernova en expansion bloquent les éventuels rayons gamma émis

au centre. Les sursauts émanent de régions de faible densité ; pourtant, leur énergie résulte d'événements cataclysmiques qui se produisent dans des régions denses, dont la taille est inférieure à 100 kilomètres : sinon ils n'émettraient pas de sursauts si brefs. Ces deux impératifs indiquent un scénario en deux étapes : production d'énergie, suivie de l'émission du rayonnement gamma.

La seconde étape a été expliquée par Martin Rees, de l'Université de Cambridge, et par Peter Mészáros, de l'Université de Pennsylvanie. Un jet de rayonnement et d'électrons, émis à une vitesse proche de celle de la lumière, ne serait pas gêné par les débris de la supernova. Après que cette boule de feu a grossi, des ondes de choc produites par l'interaction avec le gaz environnant déclencheraient l'émission du rayonnement gamma ; plus tard, des collisions avec le milieu interstellaire produiraient l'émission rémanente observée.

D'où provient ce jet énergétique ? Deux scénarios s'opposent : l'un met en jeu la coalescence de deux étoiles à neutrons, ou d'une étoile à neutron et d'un trou noir, l'autre suggère une supernova d'un type particulier qui se produit avec une étoile très massive, une hypernova. Malgré les affirmations initiales de nombreux observateurs, l'intensité des sursauts ne suffirait pas à discriminer entre ces deux hypothèses, car elles aboutissent toutes deux au même type d'objet :



TITUS J. GALAMIA European Southern Observatory

Une supernova inhabituelle est apparue (flèche) juste après qu'un sursaut gamma a été détecté. Les deux événements sont vraisemblablement liés.

un trou noir entouré d'un disque de débris.

De surcroît, ces deux modèles laissent sans réponse des questions lancinantes : qu'est-ce qui déclenche la boule de feu ? Le rayonnement est-il émis dans des jets collimatés, ou uniformément ? L'analyse de la position des sursauts dans les galaxies apporterait un premier élément de réponse : les étoiles à neutrons errent sur de grandes distances avant de coalescer, tandis que les étoiles très massives brûlent leur carburant très vite et finissent en hypernova sur le lieu même de leur naissance. Ainsi, des sursauts qui se produiraient près des régions de for-

mation d'étoiles, comme certaines observations le suggèrent, privilégieraient l'hypothèse des hypernovae.

La diversité des sursauts enregistrés laisse penser que plusieurs modèles coexistent. Cependant, les sursauts gamma engendrés par des hypernovae sont particulièrement intéressants d'un point de vue cosmologique, car ils permettraient de sonder les régions de formation d'étoiles des galaxies lointaines : comme ces régions sont généralement dans des cocons de poussières opaques, les sursauts y produiraient des éclairs décelables à de très grandes distances.

Du nouveau pour nos poumons

Des gaz aimantés pour voir l'intérieur des poumons.

L'imagerie par résonance magnétique, ou IRM, outil de diagnostic utilisé dans les hôpitaux depuis une quinzaine d'années, n'est pas adaptée à l'examen des poumons. Une nouvelle méthode, qui combine l'inhalation de gaz polarisés et leur visualisation par résonance magnétique nucléaire, comble cette lacune.

Les protons (les noyaux d'hydrogène) possèdent un moment magnétique : soumis à un fort champ magnétique extérieur, ils s'alignent dans ce champ, comme de minuscules aimants. Or les tissus sont riches en protons, de sorte qu'un tel champ magnétique y crée une petite aimantation. Cette aimantation, ou polarisation, est très faible, mais détectable par la technique

de résonance magnétique nucléaire. Les images obtenues, en deux ou trois dimensions, ont une excellente résolution (inférieure au millimètre) ; on y détecte certaines lésions invisibles par les autres méthodes d'imagerie, et le patient n'est pas exposé à des rayonnements ionisants.

Malheureusement, on ne peut pas obtenir d'images des poumons par cette méthode : les poumons étant des milieux très hétérogènes, où alternent, à l'échelle du dixième de millimètre, de l'air et des tissus, les fortes variations locales du champ magnétique brouillent les signaux de résonance magnétique nucléaire, qui disparaissent trop rapidement pour être détectés.

Pourtant, en 1994, une équipe américaine présenta les premières images par résonance magnétique de poumons de souris remplis d'un gaz polarisé, le xénon 129. Celles de poumons humains furent obtenues indépendamment, fin 1995, par le même groupe et par une équipe allemande, avec un autre gaz rare, l'hélium 3. Des physiciens du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supé-

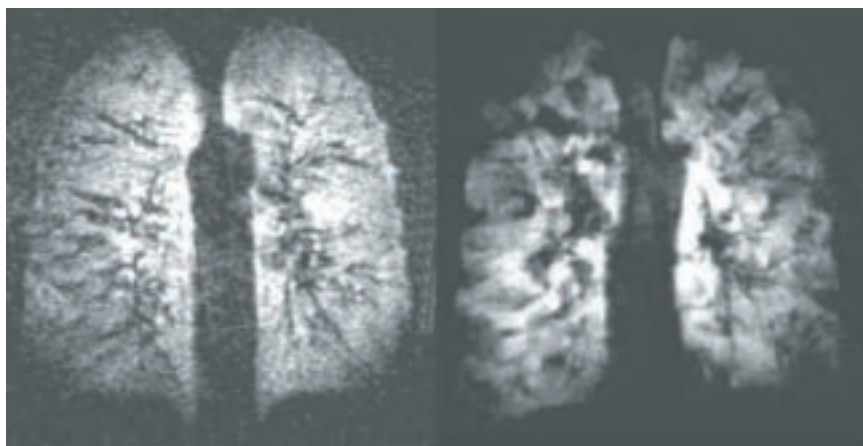
rieure, à Paris, et des physiciens et des médecins de l'Unité de recherche en résonance magnétique médicale de l'Université Paris XI, à Orsay, tentent de perfectionner la méthode.

Pourquoi l'inhalation d'un gaz polarisé améliore-t-elle les images ? Pour obtenir une aimantation détectable, on polarise le gaz avant l'inhalation, par pompage optique : un faisceau laser polarisé est envoyé sur le gaz, dont les atomes absorbent, puis réémettent, des photons. L'énergie absorbée est réémise, mais la polarisation est transférée de la lumière au gaz. Par cette technique, près de 80 pour cent des moments magnétiques s'alignent, contre un sur un million par la méthode classique (l'application d'un champ magnétique intense). Ainsi, bien que la densité du gaz soit faible, la polarisation obtenue est détectable.

Toutefois, le gaz ainsi polarisé n'est pas en équilibre, et perd progressivement sa polarisation : celle-ci disparaît au bout de ce que l'on nomme le temps de relaxation ; ce dernier atteint quelques

heures si le gaz est conservé dans des ampoules en verre spécial (car les verres ordinaires contiennent des ions paramagnétiques qui interagissent avec les atomes du gaz et détruisent leur polarisation), ce qui autorise le transport jusqu'au lieu d'utilisation. Dans les poumons, la polarisation subsiste quelques dizaines de secondes, ce qui suffit pour réaliser les clichés.

Les équipes de Paris et d'Orsay tentent de réduire la taille et les coûts des appareils, et les contraintes imposées par la méthode. Elles ont réalisé cette année les premières images de ventilation pulmonaire dans des champs magnétiques de 0,1 tesla, bien plus faibles que les champs de 1 à 4 teslas habituellement utilisés pour l'imagerie par résonance magnétique classique : pour celle-ci, des champs magnétiques intenses doivent polariser les tissus, tandis qu'avec la nouvelle méthode, les champs magnétiques servent uniquement à la détection des gaz déjà polarisés. En outre, avec le dispositif mis au point par ce groupe, l'hélium 3 est polarisé sur le lieu même de l'examen, et seuls quelques centimètres cubes de ce gaz aimanté sont nécessaires. Les clichés sont effectués en un tiers de seconde, ce qui permettra notamment de réaliser des séries d'images



Hans-Ulrich Kauczor et al.

Images de poumons réalisés à l'Université de Mayence (Allemagne) par résonance magnétique d'hélium 3 polarisé. De telles coupes renseignent sur la ventilation des différentes cavités pulmonaires. Pour un sujet sain (à gauche), cette ventilation est homogène : toutes les zones sont éclairées, car remplies de gaz, et seuls les vaisseaux sanguins apparaissent en sombre. En revanche, l'image des poumons d'un fumeur (à droite) atteint de troubles respiratoires (bronchopathie chronique obstructive et emphysème) présente de nombreuses zones sombres qui ne sont pas, ou pas suffisamment, ventilées.

qui renseigneront sur la dynamique de ventilation des bronches et des alvéoles. La résolution spatiale, déjà de cinq millimètres, devrait être améliorée.

L'inhalation d'hélium 3 est inoffensive, de sorte que des examens répétés seront possibles, ce que n'autorise pas la scin-

tigraphie (une méthode de visualisation des poumons par des gaz radioactifs inhalés, actuellement utilisée en hôpital). Enfin, une voie de recherche est l'utilisation des gaz polarisés, transportés par la circulation sanguine, comme traceurs pour l'organisme entier.

En visite

Les visiteurs des réserves naturelles ne perturbent pas les populations de lémuriens nocturnes.

L'ouverture au public des réserves naturelles menace-t-elle la faune sauvage ? Au Sud de Madagascar, des zones de forêt-galerie et de bush sont ouvertes aux touristes depuis de nombreuses années. Pendant la journée, les visiteurs jouissent du spectacle fascinant offert par les lémuriens diurnes makis (*Lemur catta*) et par les propitèques (*Propithecus verreauxi*) ; la nuit, des guides qui connaissent bien la faune sauvage leur montrent, dans le faisceau d'une lampe, les microcèbes (*Microcebus murinus*) et les lépilémurs (*Lepilemur leucopus*). Claude-Marcel Hladik et Bruno Simmen, du CNRS et du Muséum national d'histoire naturelle, ont comparé des estimations des densités de prosimiens nocturnes aux mesures qui avaient été faites sur les mêmes lieux il y a 30 ans : les diverses populations sont stables.

Dans la forêt-galerie qui s'étend sur quelques centaines de mètres de part

et d'autre du fleuve Mandrare, le lépilémur est le mammifère le plus abondant. Ce prosimien nocturne d'environ 600 grammes était très abondant en 1970.

Les éthologistes ont repris les itinéraires le long desquels les lépilémurs avaient été recensés en 1970. Dans chaque cas, les observations ont été effectuées à la lampe frontale, en début de nuit, après le réveil des animaux qui s'activent alors à la recherche de nourriture ; c'est à cette période que des cris territoriaux sont fréquemment échangés, ce qui facilite le repé-



C.-M. Hladik

Le bush de Berenty, à Madagascar, est occupé par le lémurien *Lepilemur leucopus*. Cet animal n'est apparemment pas gêné par les touristes.

rage des individus. Les plus fortes densités de lépilémurs étaient de 810 individus par kilomètre carré en 1970, contre 790 individus par kilomètre carré en 1997. Dans le bush, où les densités avaient été calculées par marquage de tous les animaux d'une petite population, les observations de 1997 ont révélé, d'après la localisation des cris territoriaux, la présence de lépilémurs dans des territoires individuels dont la superficie semble tout à fait comparable à celle qui avait été mesurée en ce même lieu, il y a 27 ans.

Quelques sorties nocturnes ont également montré la relative constance des populations de microcèbes dans le bush (où des arbres isolés poussent au milieu d'un couvert composé de buissons serrés). À Rapily, dans une zone mise en réserve pour la protection des tortues, les zoologistes ont estimé la densité de *Microcebus murinus* à 240 individus par kilomètre carré. Cette partie du bush n'est pas exactement comparable à la zone plus reculée de Bébarimo, sur socle cristallin, où les relevés de 1970 indiquaient la présence de 360 microcèbes par kilomètre carré, mais les densités restent du même ordre de grandeur : avec quelques précautions, les lémuriens supportent la présence humaine.

La prolifération nucléaire

Les essais nucléaires de l'Inde et du Pakistan démontrent qu'il est facile de fabriquer des armes nucléaires avec les combustibles produits par les centrales nucléaires civiles.

Les 11 essais du mois de mai 1998 traduisent la tension entre deux pays qui se sont affrontés à trois reprises au cours de leurs 51 années d'existence en tant que nations indépendantes. Depuis des lustres, les experts présumaient que l'Inde et le Pakistan s'étaient dotés d'un arsenal nucléaire, et les essais récents ont confirmé l'impossibilité de limiter la prolifération nucléaire. Les différentes solutions utilisées pour la confection des bombes reflètent la facilité avec laquelle les bombes thermonucléaires peuvent être bricolées. Le moratoire nucléaire actuel est fragile quand un nombre toujours plus grand de pays sont dotés de centrales nucléaires civiles produisant des combustibles nucléaires, plutonium, tritium et uranium.

Depuis les années 1950, l'Inde et le Pakistan ont développé leur programme nucléaire civil sous les auspices internationaux du programme *l'Atome pour la paix*. Les États Unis fournirent à l'Inde les plans, le savoir-faire et les dispositifs majeurs pour le retraitement du combustible des réacteurs, mis en œuvre dans une usine à Trombay, au Nord de Bombay.

Le retraitement extraie, pour les réutiliser, les différents éléments du combustible irradié des réacteurs ; l'un d'entre eux, le plutonium 239 est le constituant de base de la plupart des bombes thermonucléaires. Le centre de retraitement de Trombay, construit à la fin des années 1950 et au début des années 1960, utilise le procédé américain *Purex* de séparation du plutonium.

Le plutonium résulte de l'irradiation des combustibles nucléaires dans les réacteurs civils. Le Canada avait livré à l'Inde, à la fin des années 1950, le réacteur de recherche *Cirus* à eau lourde (utilisée comme

ralentisseur de neutrons) où le taux de conversion d'uranium 238 en plutonium 239 est élevé. Avec *Cirus* et l'usine de Trombay, les ingénieurs nucléaires indiens avaient produit suffisamment de plutonium pour fabriquer la bombe atomique qu'ils firent exploser en 1974.

Ce test mit fin à l'aide internationale, mais les scientifiques indiens purent néanmoins construire des réacteurs à eau lourde imités du modèle canadien et des usines de retraitement : en 1985 un réacteur de production de plutonium, dénommé *Dhruva*, était opérationnel à Trombay. Le programme indien incluait également, près de Mysore, un centre de production de tritium, autre combustible des bombes thermonucléaires, et une usine d'enrichissement d'uranium 235.

Mais la production majeure était le plutonium. Les experts estiment que l'ensemble des installations indiennes ont accumulé 1,2 tonne de plutonium, quantité suffisante pour une dizaine, voire une centaine de bombes, selon la technicité atteinte par les spécialistes indiens. L'effort militaire considérable et la grande qualité de leurs scientifiques permirent aux Indiens de maîtriser l'ensemble du cycle nucléaire, de l'extraction de l'uranium à la construction de réacteurs à la pointe de la technique.

Il n'est toutefois pas certain que la troisième bombe indienne ait été une véritable bombe thermonucléaire. La

puissance du test du 11 mai aurait été, aux dires du gouvernement indien, de 43 kilotonnes, mais les experts, au vu des enregistrements sismographiques, pensent que la puissance était moindre, 25 kilotonnes, typique d'une réaction de fission améliorée, plutôt que d'une réaction de fusion. D'autres spécialistes estiment que les Indiens maîtrisent la fusion, mais que la faible puissance de leur test était voulue et qu'ils voulaient parfaire leur maîtrise de la technique, plus difficile à contrôler sur des bombes de faible puissance.

Le programme nucléaire pakistanais utilise plus systématiquement l'uranium 235. Cet isotope de l'uranium ne constitue que 0,72 pour cent de l'uranium naturel et cette teneur est augmentée dans des usines d'enrichissement. La séparation isotopique est réalisée par centrifugation dans le Centre de recherche de Kahuta, près de Islamabad. Le père de la bombe pakistanaise, Abdul Qadeer Khan, s'était procuré les plans des centrifugeuses mises au point par une société hollandaise, *Ultra-Centrifuge*, dans les années 1970.

La masse critique d'uranium nécessaire pour la confection d'une bombe est beaucoup plus élevée que la masse critique de plutonium, et la fabrication de missiles nucléaires avec des bombes à uranium est plus difficile. Pour les bombes pakistanaises de type chinois, de conception rudimentaire, il fallait au moins 15 kilogrammes d'uranium de qualité militaire (enrichi en uranium 235 à plus de 93 pour cent), alors que pour les bombes à plutonium il suffit de trois à six kilogrammes de produit fissile. Les militaires américains estiment que les Pakistanais ont suffisamment d'uranium pour fabriquer une trentaine de bombes par an et que leur possibilité d'enrichissement correspond à cinq bombes par an. De plus, les programmes de construction de réacteurs et de centres de retraitement pourraient amener les Pakistanais à produire annuellement 10 à 15 kilogrammes de plutonium.

Les efforts diplomatiques tendent à persuader ces nouvelles puissances nucléaires de signer le traité de non-prolifération et de les amener à renoncer à placer leurs charges sur des missiles. À court terme, ces espoirs semblent ténus.

Glenn ZORPETTE
et Tim BEARDSLEY



Titre de ce journal pakistanais publié après les essais nucléaires : «Nous détruirons l'Inde».