

la lettre
de l'Académie des Sciences

n° 3 / printemps 2002



Longévitité
Vieillissement

Sommaire

Éditorial

La recherche fondamentale
et le devoir
de communiquer

Étienne-Émile Baulieu
page 2

Dossier

Longévité et vieillissement :
aspects scientifiques, médicaux
et sociaux

Étienne-Émile Baulieu
page 3

Biologie du vieillissement

Entretien avec Richard A. Miller par Paul Caro
page 7

Aspects médicaux et sociaux
du vieillissement

Maurice Tubiana
page 9

Actualités du passé

Mystification à l'Académie
des sciences

Jean-Paul Poirier
page 10

Questions d'actualité

Les neutrinos, omniprésents
et insaisissables

Michel Davier
page 12

Les matériaux vieillissent aussi...

André Zaoui
page 14

La vie des séances

Interaction homme-machine.
Quelques aspects

Éric Spitz et Philippe Coiffet
page 17

Les phénomènes aux interfaces
et les Géosciences

Jean Maurice Cases
page 19

La vie de l'Académie

Relations avec l'Académie
des sciences du Sénégal

Yves Quéré
page 20

L'enseignement en Bolivie

Yves Quéré
page 20

Élections d'Associés étrangers

page 20

Camet

La Grande médaille d'or 2001
de l'Académie des sciences

page 20

Éditorial

Le plus important comprendre,
et si possible évaluer : tel est
l'enjeu de la communication.

Les questions scientifiques naissent de
deux sortes de préoccupations. D'une
part, le comment et le pourquoi, liés à la
curiosité pour les phénomènes naturels
inexpliqués et, parfois, pour la seule
raison qu'on peut (qu'on doit) persévérer
sans limite dans le raisonnement et l'hy-

verte, comme exercice et plaisir de l'es-
prit, mais l'exigence est plus haute : véri-
fier à notre échelle humaine – tempo-
rellement et socialement définie –
douter, remettre les données acquises
en discussion et souvent, à nouveau, en
chantier.

Avancer toujours plus, ce que fait
l'Homme en dépit de son côté nihiliste
et destructeur dont les années que nous
venons de vivre ont montré la force
effrayante. Cependant, la meilleure con-
naissance de l'Univers cosmique, les
transmissions quasi instantanées, l'aug-
mentation explosive de la longévité
signent la réussite de notre espèce qui,
jusqu'à présent, a évité les dangers les
plus graves : les anciens n'attribuaient
pas plus de pouvoir aux dieux. Quelles
que soient leurs craintes – au demeu-
rant naturelles et qui nous aident à
définir les valeurs humaines – ce sont

société afin de préparer les prises de
position de l'Académie sur les grandes
questions en débat ; plusieurs confrères
ont déjà entrepris cette réflexion indis-
pensable. L'autre (Délégation à l'infor-
mation scientifique et à la communi-
cation) a pour mission de présenter aux
média nationaux et internationaux les
découvertes de nos chercheurs et les
réflexions de l'Académie, les conclusions

atteintes par les réunions
que nous organisons ; elle
n'hésitera pas à les trans-
mettre aux autorités civiles,
politiques et administratives,
aux sociétés savantes et aux
organismes de recherche.
Le Bureau s'efforcera de
mettre tous les moyens
nécessaires et personnels à
la disposition des confrères
impliqués dans cette tâche.

Cette ouverture devrait permettre de
gagner la confiance du plus grand
nombre de nos concitoyens dans nos
travaux scientifiques, dans la science en
général et, par là même, de contribuer
à l'équilibre des activités de la société
qui en dépendent presque directement,
qu'il s'agisse des questions biomédicales
– les aliments, les cellules souches, la
reproduction, le bio-terrorisme..., ou
encore de l'écologie, des énergies, de
l'eau disponible...

Du grain à moudre pour l'Académie ■

La recherche fondamentale et le devoir de communiquer

Une responsabilité prioritaire de l'Académie : *favoriser obstinément
la recherche fondamentale et la faire connaître.*

pothèse. D'autre part, le pour qui, selon
la nature du résultat et ses consé-
quences sur les hommes et les autres
organismes vivants, animaux et végé-
taux, et sur les composantes matérielles
et énergétiques de l'Univers. L'hypothèse
a sa place comme instrument de décou-

vrir bien les hommes qui découvrent et
maîtrisent la nature, et c'est à l'activité
scientifique que l'on doit les plus impor-
tants changements du destin de l'hu-
manité. Cette science est le bien
commun de tous ; à tous de le savoir, de
le comprendre, et à l'Académie des
sciences de tout "donner à voir" (Paul
Eluard), depuis la racine fondamentale
jusqu'aux applications matérielles et à
leurs conséquences morales.

Pour ces raisons, notre compagnie a
choisi d'ajouter à l'indispensable (et très
active) Délégation aux relations inter-
nationales, deux nouvelles formations
opérationnelles avec chacune à leur tête
un(e) confrère (sœur) élu(e) en comité
secret. Pour l'une (groupe Science et
Société), il s'agit de réunir les données
principales de la science en marche et
de les confronter aux problèmes de la



par Étienne-Émile Baulieu

Vice-président de l'Académie des
sciences, Professeur au Collège
de France

Le vieillissement ne concerne plus seulement l'individu mais la société toute entière. Les chercheurs, au premier chef ceux des domaines biomédicaux, ont une responsabilité primordiale pour que soient prévenues et éventuellement traitées les maladies liées à l'âge. Il est nécessaire que les responsables politiques dégagent les moyens nécessaires pour permettre de mieux comprendre la longévité et le vieillissement, et tout ce qui peut en découler médicalement : sans bonne santé physique et mentale des

& Longévité vieillessement : aspects scientifiques, médicaux et sociaux

personnes âgées, on court à la catastrophe pour chaque individu et pour la collectivité humaine tout entière – alors que les progrès exceptionnels des sciences biomédicales peuvent être mises en œuvre dès à présent.

Il n'est que temps de s'en occuper. L'Académie des sciences, l'Académie des sciences morales et politiques, l'Académie nationale de médecine et l'Academy of Medical Sciences of the United Kingdom se sont réunies pour organiser un colloque qui s'est tenu les 29 et 30 octobre 2001 et qui a été suivi par plusieurs centaines d'auditeurs.¹

Par Étienne-Émile Baulieu²

Quelle période extraordinaire, au plein sens du terme ! Jamais, dans l'histoire des hommes, n'a été enregistré un accroissement de la longévité aussi important – trois mois chaque année de façon soutenue pendant plusieurs décennies et apparemment sans ralentissement annoncé – si bien que plus de 50 % des femmes, actuellement, atteignent et dépassent 85 ans dans notre pays et que l'on prédit que la moitié des filles nées au début de ce siècle seront en vie au début du ^{XXII} siècle ; les hommes suivent, avec quelques années (5 à 8) d'espérance de vie en moins si rien ne change à cet égard. Ces données impressionnantes sont valables pour les

autres pays industrialisés, et transposables dans leur mouvement aux pays en développement. Une première conséquence, en dépit du ralentissement du nombre des naissances d'ailleurs encore trop élevé : la population mondiale continuera à augmenter de 90 millions par an pendant encore plusieurs décennies. Que de nouvelles questions pour chacun, pour les familles (à 4 ou 5 générations), pour la société (les retraites, la désinsertion sociale, les soins médicaux). Il est évident qu'un seul Colloque ne peut avoir abordé qu'un nombre limité des problèmes biologiques, médicaux et sociaux posés par le vieillissement en général et l'augmentation contempo-

raïne de la longévité humaine en particulier. Nous ne faisons que reprendre ici les principaux thèmes traités par les participants, en ajoutant quelques considérations personnelles permettant de donner une meilleure vue d'ensemble aux lecteurs.

La longévité : une affaire de gènes ?

Une femme ou un homme affaibli musculairement, dont le système immunitaire est diminué, les réflexes et la mémoire moins efficaces, la peau altérée et les cheveux gris est vieux. Il a 82 ans, et des signes analogues peuvent être observés chez des chimpanzés de 32 ans, des chevaux de 22, des chiens de 12 ou des souris et des rats de 2 ans. Pourquoi vieillit-on à des âges différents dans chaque espèce chez les mammifères (les seuls que nous évoquons ici) ? Y a-t-il un (ou 2 ou 3) "gènes-horloges" qui serai(en)t spécialisé(s) dans l'éva-

luation du temps qui passe, indépendamment ou presque des conditions extérieures à l'individu ? Personne ne le pense plus. Cependant, il y a des gènes qui règlent de grands métabolismes et dont les propriétés modifiées (mutation) pourraient entraîner une longueur de vie différente. C'est le cas des gènes qui contrôlent les réponses au stress (de la chaleur, de l'oxydation), ou de ceux qui règlent le taux de l'hormone de croissance ou de son médiateur, le facteur IGF1. Il ne s'agit pas de gènes qui évaluent directement la durée de la vie,



¹ Cette présentation ne résume pas la richesse des exposés que l'on trouvera publiés in extenso dans les *Comptes Rendus*, ainsi que, pour certaines questions spécifiques, dans le *Bulletin de l'Académie de médecine* et dans la *Lettre d'information hebdomadaire de l'Académie des sciences morales et politiques*.

² Vice-président de l'Académie des sciences, Professeur au Collège de France, Membre de l'Académie nationale de médecine...



mais de systèmes de régulation pour accommoder l'organisme aux composantes de l'environnement, au sens le plus large de ce mot. La seule restriction calorique, par exemple, permet de prolonger la durée de la vie des rongeurs, montrant que la recherche fondamentale peut quelquefois mener à des interventions pratiques simples et efficaces (R. Miller)³. G. Martin⁴ qui dirige le programme SAGE KE (Science of Aging Knowledge Environment) initié par la revue *Science*, a proposé, après les analyses classiques de Peter Medawar et George Williams, une classification des modalités génétiques impliquées dans la longévité et le vieillissement humain, sur la base de la théorie de l'évolution. La pression sélective s'exerce évidemment dans le cadre des risques écologiques, et si ceux-ci sont élevés, les espèces sélectionnées se développent et se reproduisent rapidement, avec pour conséquence logique une existence relativement courte des individus. Les survivants auront un phénotype ayant échappé à la sélection naturelle et, qu'ils soient bons ou mauvais, ils contribuent peu à la constitution génétique des générations ultérieures. Pour le genre humain, on peut distinguer de "bons" allèles toujours actifs, ou peu exprimés pour de bonnes raisons, ou trop exprimés tard dans la vie, ou devenant délétères en fin de vie, ou mutés pathologiquement, et des "mauvais" gènes qui ne s'expriment que tard. Les exemples seront trouvés dans le texte complet et leur discussion dans la contribution de P.H. Gouyon⁵ (voir encadré dans la lettre).

Le séquençage du génome humain devrait faire reconsidérer tous les aspects de la recherche gérontologique dans un cadre "post-génomique" : l'évolution dans le temps des phénomènes biologiques (recherches "horizontales") et l'analyse des affections pathologiques associées permettent en effet de cibler et de traiter les anomalies définies à tous les niveaux, dans des approches verticales, des gènes à la pharmacologie (D. Cohen⁶). La morbidité aux âges les plus avancés relève de maladies chroniques multifonctionnelles, en particulier cardio-

vasculaires et de neurodégénérescence. Leur survenue, leur progression et éventuellement leur traitement dépendent de déterminants environnementaux et de la capacité individuelle à y faire face physiquement et par le comportement. La transmission familiale ne suit pas les lois simples de la génétique mendélienne : les techniques de biologie moléculaire à haut débit, désormais utilisables dans les études épidémiologiques avec les approches géniques et post-génomiques correspondantes, doivent permettre l'identification de sous-groupes dont la prise en charge différenciée sera plus efficace (Ph. Amouyel⁷).

La biologie cellulaire indique l'importance de la "sénescence" cellulaire (les cellules ne se divisant plus et les télomères diminuant) comme processus anti-cancéreux. Mais il y a d'autres modalités télomères-indépendantes ; par exemple, la séquence RAF décrite chez l'homme (R. Faragher⁸).

Vieillir comment ?

A côté de la menace du cancer du point de vue strictement biologique, il faudrait encore évoquer les problèmes généraux tels que les effets et la tolérance des traitements médicaux des cancers (chimiothérapie, radiothérapie, hormones) chez les sujets âgés et le problème des indications chirurgicales (on sait que les décisions d'interventions chez les personnes âgées sont souvent difficiles à prendre), etc...

Le cerveau, le plus complexe de nos organes, est aussi le plus exigeant et le plus vulnérable : l'activité neurale demande un important apport incessant d'oxygène et de glucose pour fonctionner. La plupart des milliards de neurones qui le composent sont différenciés dès avant la naissance et les possibilités de régénération sont limitées ; la gravité des blessures et des accidents d'origine vasculaire en découlent. Dans certaines parties du cerveau, il y a perte et/ou altération des neurones et de leurs connexions avec l'âge. C'est le cas des cellules produisant les catécholamines (adrénaline, noradrénaline et dopamine) dont la dérégulation peut entraîner, par exemple, la maladie de Parkinson et son cortège de troubles neurologiques. L'épaisseur de certaines régions associatives du cortex cérébral diminue de 0,5 % par an ; la perte neuronale est intense au cours de la maladie d'Alz-

heimer, entraînant la diminution progressive des fonctions intellectuelles. Cependant, comme l'a souligné L. Iversen⁹, la notion classique de l'impossibilité de formation de nouveaux neurones dans le cerveau adulte n'est plus admise. Des cellules souches neurales indifférenciées continuent à se former et peuvent, après implantation, se développer dans le cerveau en générant neurones et/ou cellules gliales caractéristiques de la région cérébrale du transfert. La neurogénèse est très active dans l'hippocampe (1 neurone produit chaque jour pour 2000 qui existent déjà). Il semble même que des médicaments anti-dépresseurs agissent en augmentant la survie de neurones néoformés dans le cerveau. Le futur immédiat dans ce domaine appartient à la recherche.

J.-J. Hauw¹⁰ a relevé l'extension topographique des lésions neuroanatomiques associées à un métabolisme anormal de la protéine Tau : une progression hiérarchique stricte, inexpliquée, paraissant suivre les circuits impliqués dans la mémoire, et progressant plus ou moins vite selon des facteurs de risque génétiques et épigénétiques. On rappellera que des lésions du même type qu'au cours de la maladie d'Alzheimer, impliquant la participation anormale du peptide A β , sont quasi constantes chez les centenaires. A défaut de connaître la cause première, des produits modulateurs de l'évolution d'une maladie et même des traitements symptomatiques pourraient être efficaces, d'autant que des facteurs associés de type vasculaires sont, par exemple, souvent observés dans la maladie d'Alzheimer. Il existe une autre catégorie de démences dites vasculaires, avec destruction de tissu cérébral dans des zones spécifiques, quelquefois minimales volumétriquement. D'actualité récente, les démences dues à un agent transmissible (prions) sont rares et le plus souvent gravissimes dans un contexte au pronostic vital dramatique.

Des cohortes permettant l'étude de l'épidémiologie du vieillissement cérébral sont nécessaires pour définir les facteurs de risques, génétiques et épigénétiques, en particulier pour la maladie d'Alzheimer comme l'a rappelé J.-F. Dartigues¹¹. Paquid (Personnes

Agées QUID) dans la région de Bordeaux avec ses 4000 personnes étudiées depuis plus de 10 ans et l'étude des 3 Cités qui commence à Bordeaux, Dijon et Montpellier (environ 10000 personnes) sont les exemples français les plus remarquables au cours desquels, aux études cliniques et humorales, s'ajoutent maintenant l'imagerie cérébrale par résonance magnétique et la constitution d'une banque d'ADN.

F. Forette¹² a évoqué aussi l'importance de la prévention des démences chez les sujets hypertendus traités. Elle rapporte également la diminution significative de l'incidence des accidents vasculaires cérébraux et des cardiopathies ischémiques. Parmi les facteurs de risque de la maladie d'Alzheimer (âge, sexe, niveau d'éducation, facteurs génétiques), seule la prise en charge du risque vasculaire a permis jusqu'à un bénéfice démontré ; d'autres approches préventives (hormones, anti-inflammatoires, anti-radicalaires, inhibiteurs de sécrétase, immunisation anti-amyloïde) sont en cours d'évaluation. Si l'hétérogénéité du vieillissement relève certainement de facteurs génétiques, les facteurs d'environnement, accès aux soins en particulier, sont tout aussi importants et éventuellement modifiables. La prévention du vieillissement pathologique reste une des clés de la promotion du vieillissement en bonne santé.

Le vieillissement cardiovasculaire se traduit principalement par l'hypertension artérielle et l'insuffisance coronarienne, les deux aboutissant en particulier à l'insuffisance cardiaque. C'est globalement la cause la plus fréquente, après 70 ans, de mortalité et de morbidité (évaluée en nombre de jours d'hospitalisation et par la consommation de médicaments). B. Swynghedauw¹³ a résumé la situation en soulignant l'augmentation de l'impédance des gros vaisseaux et la mise en jeu de systèmes compensateurs permettant un débit sanguin normal, même à l'effort. On en tirera les conséquences de prévention et de traitement. On sait les remarquables effets enregistrés dans les populations où les mesures diététiques et certaines médications à visée pathogéniques ont été employées.

Les grands systèmes régulateurs que sont les fonctions immunitaires et hormonales sont modifiées au cours du vieillissement. J.-F. Bach¹⁴ a indiqué la responsabilité de l'altération des premières dans la survenue des affections et même des tumeurs, et dans

³ millerr@umich.edu et entretien avec Richard Miller page 5

⁴ gmmartin@u.washington.edu

⁵ pierre-henri.gouyon@desv.u-psud.fr et numéro spécial des Comptes Rendus, 2002, à paraître

⁶ dcohen@genset.fr

⁷ philippe.amouyel@pasteur-lille.fr

⁸ rgaff@brighton.ac.uk

⁹ les.iversen@pharm.ox.ac.uk

¹⁰ jean-jacques.hauw@psl.ap-hop-paris.fr

¹¹ Jean-Francois.Dartigues@isped.u-bordeaux2.fr

¹² francoise.forette@brc.ap-hop-paris.fr

¹³ bernard.swynghedauw@inserm.lrb.ap-hop-paris.fr

¹⁴ bach@necker.fr



l'augmentation des maladies auto-immunologiques. Les mécanismes impliqués dans le vieillissement immunitaire sont encore très peu connus et méritent une recherche soutenue. L'évolution hormonale liée à l'âge est relativement mieux décrite ; celle qui concerne les stéroïdes, rapportée par l'auteur de ces lignes (E.E. Baulieu¹⁵), est différentielle selon qu'il s'agit des hormones sexuelles de la femme, dont la production est arrêtée à la ménopause, ou de l'homme chez qui dont on ne sait pas si la baisse partielle et inégale des androgènes selon les individus doit être compensée pour s'opposer à une série de déficits "climatériques" liés à l'âge. En tout cas, si dans les deux sexes l'hormone surrénalienne DHEA (S) diminue de façon importante, le cortisol sanguin reste au même niveau à tous âges, et ce déséquilibre mérite d'être envisagé dans ses conséquences et éventuellement compensé, sous surveillance médicale, par l'administration de DHEA. On sait qu'il n'y a pas de pilule miracle, ni de fontaine de jouvence et que, selon le cas, c'est au niveau du système nerveux, ou du système immunitaire, ou de la peau, ou encore de l'ensemble ostéo-musculaire que l'on peut attendre des effets. La participation de modifications hormo-

Il est vrai que la vieillesse est un état qui ne permet guère qu'on l'oublie.

**François Mauriac,
le Nouveau Bloc-notes
1958-1960.**

nales aux troubles psychiatriques du sujet âgé n'est pas définie. Plus généralement, chez une personne sans antécédent de maladie mentale, "le diagnostic d'un trouble étiqueté psychiatrique après 60 ans balance (le plus souvent) entre dépression et détérioration" (A. Fagot-Largeault¹⁶). Les psychothérapies n'ont pas démontré un grand effet sur "le rétrécissement existentiel, qualitatif et quantitatif, du grand âge". Les médicaments anti-dépressives, neuroleptiques et anxiolytiques, souvent administrés simultanément devant un tableau complexe, ne sont pas sans effets secondaires, et de toute façon souvent lents à agir chez des sujets qui n'ont pas le temps d'attendre. Que de recherches en perspective !

L'augmentation de la longévité, caractéristique individuelle comme l'a rappelée H. Leridon¹⁷, est responsable de l'accélération du vieillissement de la population, caractéristique collective. Les sociétés entrent dans une ère inconnue nécessitant, au-delà des recherches biomédicales, des travaux en sciences sociales portant sur les modalités et déterminants de l'avance en âge, les relations entre générations, la constitution sociale de représentants de la vieillesse, avec les conséquences

pratiques, comportementales, au niveau des personnes et des sphères économiques. Les "perspectives démographiques", pour reprendre l'expression de J. Dupâquier¹⁸ traitant d'hypothèses plausibles, soulignent la difficulté des prévisions. Par exemple, le nombre attendu de générations par famille pourrait ne pas augmenter du fait de l'accroissement moyen de l'écart entre les générations.

Quant à la qualité du vieillissement, elle semble augmenter depuis plusieurs décennies, accompagnée par la perception d'être en meilleure santé. Les études décrites par J.-P. Michel¹⁹ confirment la théorie de la compression à la fin de la vie de la morbidité et des affections mentales, et la rectangularisation de la courbe de survie progresse. La perte d'autonomie des personnes âgées impose plus de recherches pour capturer à domicile, de manière non invasive et bien acceptée les paramètres vitaux permettant une surveillance qui rassure les sujets et les personnes leur portant assistance. La longévité étant multifactorielle, les informations doivent fusionner afin de suivre simultanément les variables signalant l'état des grandes fonctions vitales (J. Demongeot²⁰). Les progrès technologiques devraient

¹⁵ baulieu@kb.inserm.fr

¹⁶ anne.fagot-largeault@college-de-france.fr
¹⁷ leridon@ined.fr

¹⁸ 197, rue Saint Jacques 60240 Delincourt
¹⁹ jean-pierre.michel@hcuge.ch
²⁰ jacques.demongeot@imag.fr



permettre de moduler l'état de dépendance, évidemment crucial pour la place à donner et le rôle des personnes du quatrième âge dans la famille et la société (L. Israël ²¹).

Au cours de ses remarques de conclusion, J.-F. Girard ²², dont l'expérience de directeur général de la Santé a nécessairement contribué au réalisme lucide et humain dont il fait preuve, observe que "l'alliance de la science et de la médecine pouvait faire croire à un avenir sans maladies ou tout au moins sans maladies qui ne soient guérissables. Il suffisait donc, en matière de santé, de s'en remettre aux médecins, et la société ne s'est pas privée de cette délégation... ! Quelle responsabilité pour les médecins !". L'épidémie de sida a pris tout le monde au dépourvu, à commencer par les médecins totalement incapables de soigner au début. La société "a compris qu'elle devait prendre en charge les problèmes posés par l'épidémie et imposer aux pouvoirs publics d'assumer leur rôle : c'était le retour de la santé publique". Après l'avènement des trithérapies, la remédicalisation de l'épidémie indique bien les rôles complémentaires de la médecine et de la société. La maladie d'Alzheimer est un autre exemple de cette nécessaire complémentarité, on l'a bien compris. Plus généralement d'ailleurs, il ne faudrait pas que les problèmes posés



H. Curien [Président de l'Académie des sciences] et E. E. Baulieu accueillent R.G. Schwartzberg [ministre de la Recherche].

par la vieillesse soient entièrement confiés aux institutions soignantes : "la personne âgée malade ne se réduit pas à sa maladie". La médecine, malgré ses progrès incessants, n'exonèrera jamais la société d'assumer ce qui n'est, après tout, que la conséquence de l'allongement de la durée de vie. Qui s'en plaindra...

Maintenant et demain

Nous avons déjà évoqué les difficultés de la situation démographique nouvelle, qui ne peuvent que croître alors qu'une longévité plus importante devrait n'être qu'une source de bonheur ajouté. Dans cette situation de révolution silencieuse, le désir d'un vieillissement moins handicapant, en bonne santé physique et mentale, est légitime, et justifie les efforts de recherche sur le vieillissement physiologique, la prévention des maladies et des déficits qui deviennent plus nombreux et plus graves avec l'âge. R.G. Schwartzberg a annoncé au cours du colloque le soutien du Ministère de la Recherche aux premières activités d'un "Institut de la longévité et du vieillissement", Groupement d'intérêt scientifique (GIS) qu'il prendrait en charge, en collaboration avec le ministère de la Solidarité et celui de la Santé, avec le concours de l'INSERM et du CNRS, et en s'associant selon les cas, avec des sociétés privées et des associations de patients sans but lucratif. Les premiers thèmes retenus après consultation de très nombreux scientifiques et médecins sont ceux pour lesquels la recherche n'est pas avancée, mais où nous pouvons compter sur des personnalités françaises de recherche de qualité exceptionnelle, susceptibles d'animer un secteur considéré souvent négligé : à titre d'exemple, citons la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), la presbycusie, les troubles de l'équilibre, générateurs de chutes, le cancer de la prostate, le vieillissement de la peau, les risques de démence et des études de pharmacologie spécifiques sur les personnes âgées, un effort pour disposer en France de modèles animaux, principalement des rongeurs en nombre suffisant, sans compter les travaux sur les capteurs de surveillance et la création de 2 ou 3 centres d'investigation clinique (CIC), spécialisés dans le vieillissement.

Quel que soit le domaine des recherches biomédicales auxquelles ils s'adonnent, tous les chercheurs, biologistes ou médecins peuvent, sans être spécialistes de gérontologie, contribuer à ce grand effort coordonné rendu nécessaire par l'augmentation de la longévité : devant le nouvel espace temporel qui s'ouvre pour la vie du plus grand nombre, il y va beaucoup du bonheur personnel et familial de chacun et de l'équilibre social ■



Comment l'évolution a-t-elle déterminé la longévité des individus dans les différentes espèces ?

Par **Pierre-Henri Gouyon** ¹

Dans le cadre de la théorie darwinienne de l'évolution, le vieillissement et la mort programmés des individus semblent a priori incompréhensibles. En effet, comment comprendre que des informations génétiques provoquant la disparition de l'individu, ou au moins, une baisse de ses capacités de survie et/ou de reproduction aient pu être produites par le jeu de la mutation et de la sélection naturelle ? Bien sûr, il existe des réponses qui, malgré une naïveté touchante ont pu paraître évidentes. Ce sont les réponses du style "les vieux meurent pour laisser la place aux jeunes". Ces réponses sont qualifiées, chez les évolutionnistes, de panglossiennes, par allusion au précepteur de Candide dans le conte de Voltaire (la référence serait due à Haldane). Il est étonnant de voir ainsi prêter à la Nature une conscience des nécessités de l'avenir hors du commun et que nous-mêmes sommes loin de posséder ! L'erreur tient au fait qu'un tel comportement ne se justifie que par référence au groupe alors que la sélection agit à l'échelle de l'individu. Dans une espèce où chacun meurt pour laisser la place aux descendants, un mutant qui ne meurt pas est favorisé dans la mesure où

ses propres descendants n'en souffrent pas plus que les autres.

Il est donc nécessaire de trouver une raison plus terre à terre. De Haldane à Williams en passant par Hamilton, les hypothèses se sont succédées et ont conduit à l'élaboration d'une théorie somme toute assez satisfaisante. D'une part, le fait que les individus meurent par accident un jour ou l'autre fait que la sélection en faveur de la survie de l'individu faiblit au fur et à mesure que son âge augmente. D'autre part, il existe des gènes dont l'action (pléiotrope) est antagoniste selon l'âge de l'individu (favorable au stade jeune et défavorable au stade adulte par exemple). Enfin, la sélection pour le maintien de l'intégrité de l'individu dépend beaucoup du moment où la mortalité par accident (ou plutôt pour des causes externes) se produit le plus souvent. Une telle mortalité se produisant préférentiellement avant le stade reproductif favorise des génotypes à grande longévité alors que si elle produit en général après la reproduction, la sélection favorise un investissement total dans la reproduction et une mort survenant tôt. Quelles conséquences ont ces considérations sur la façon dont on peut réfléchir à l'approche médicale du vieillissement ?

²¹ 36, rue du Mont Thabor 75001 Paris
²² jean-francois.girard@conseil-etat.fr

¹ Professeur à l'Université Paris-Sud et à l'École polytechnique, Directeur du laboratoire d'écologie, systématique et évolution du CNRS à Orsay

Biologie du vieillissement

Entretien avec Richard A. Miller¹



Réalisé par Paul Caro²

Question :

Vous participez au Colloque "Aspects scientifiques, médicaux et sociaux de la longévité et du vieillissement" (Paris 29-30 octobre 2001), quelle est votre définition du vieillissement ?

Réponse de Richard A. Miller :

Je définis le vieillissement comme un processus qui transforme de jeunes adultes sains en adultes plus âgés qui ont plus de risques d'être victimes de toutes sortes de maladies potentiellement mortelles, mais aussi d'infirmités qui leur rend la vie moins agréable. C'est une définition qui ne paraît pas polémique parce qu'elle est en bon accord avec l'emploi habituel du mot "vieillesse" dans le langage ordinaire. Cependant parmi les chercheurs elle est considérée comme un peu polémique parce que beaucoup d'entre eux utilisent le mot "vieillesse" dans un contexte très spécialisé. Certains préfèrent par exemple une définition qui peut s'étendre aux processus affectant les cultures de cellules, mais je trouve que cela est plus trompeur qu'utile. Je recommande une définition qui prenne en compte l'animal entier et aussi la manière dont le vieillissement affecte la santé.

Question :

Quelles sont les causes du vieillissement ?

R. A. Miller :

C'est une question difficile ! La réponse dépend du niveau de l'explication. Les causes du vieillissement d'un point de vue évolutionniste sont connues depuis quinze ans. Elles expliquent pourquoi il faut que presque tous les genres d'animaux multicellulaires vieillissent, c'est à dire subissent un accroissement du risque de mortalité avec le temps. On peut le comprendre assez aisément en termes de génétique des populations d'une manière quantitative. Mais beaucoup de gens demandent une explication moléculaire, c'est à dire une description des processus moléculaires qui convertissent d'une manière synchronique un jeune individu en vieillard. Et la réponse à cela est très simple : personne ne le sait !

Question :

Existe-t-il un rapport entre le système immunitaire et le vieillissement ?

R. A. Miller :

Je ne pense pas que le système immunitaire soit une importante horloge qui contrôle le vieillissement. Je ne pense pas que les changements dans l'immunité soient la cause de la plupart des maladies de la vieillesse. Je pense qu'il est utile d'étudier le système immunitaire parce qu'il fournit d'excellentes possibilités pour étudier comment le vieillissement conduit à des dysfonctionnements au niveau des cellules et au niveau moléculaire. Le vieillissement a des effets très importants, chez les animaux, sur des systèmes qui impliquent des communications intercellulaires, en particulier celles qui répondent au stress. Beaucoup d'individus de 60, 70, ou 80 ans sont raisonnablement capables de supporter la vie quotidienne. Mais quand le stress survient, quand ils découvrent qu'un autobus fonce vers eux, ils ont besoin de réagir très vite, et

ils sont en beaucoup plus grand danger de mourir qu'une jeune personne. C'est pareil s'ils attrapent la grippe. Le système immunitaire est un excellent sujet d'étude pour les gérontologues parce qu'il répond au stress. Et ses fonctions protectrices diminuent évidemment avec l'âge. Ce système est si bien connu aux niveaux cellulaires et moléculaires qu'il existe de nombreux outils et des expériences sophistiquées qu'un immunologiste peut faire et qui ne sont pas possibles pour d'autres systèmes. Il est facile d'avoir des cultures de cellules qui fonctionnent bien pour des réactions immunologiques. Vous ne pouvez pas faire de cultures de cellules qui pensent ou qui exécutent les fonctions du rein. Le système immunitaire marche plutôt bien in vitro et cela est très utile pour étudier la manière dont le vieillissement conduit à des dysfonctionnements.

Question :

Dans votre exposé, vous avez décrit les effets positifs de la restriction calorique sur presque tous les aspects du vieillissement. Mais la restriction calorique n'est-elle pas une forme de stress ?

R. A. Miller :

Le mot "stress" est très général ; dans des contextes différents, le stress peut avoir des effets très divers. Un vieillard, ou une vieille souris, qui subit le stress d'une infection risque la mort ou une maladie grave. Mais il pourrait être possible de créer des individus qui vieillissent plus lentement ou qui vivent plus longtemps en leur imposant des degrés mesurés de stress quand ils sont jeunes. Bien entendu ceci n'est qu'une hypothèse. Le mot général pour cela est "hormesis" et on ne dispose pas de résultats qui montrent les effets de l'hormesis sur le vieillissement chez les drosophiles, dans les travaux de Mark Tatar et Jim Curtsinger. Ils ont montré que si l'on expose des drosophiles à un stress non mortel, quand elles sont jeunes, un stress thermique, par exem-

ple, on observe ensuite une diminution des risques de mortalité. Ainsi, l'imposition d'un léger niveau de stress a conduit les mouches à vieillir plus lentement. Pour les mammifères, on a des indications semblables dans les cas de restriction calorique. Les animaux soumis à une restriction calorique ont une teneur légèrement plus élevée que la normale en hormones glucocorticoïdes qui commandent les réponses de l'organisme à un stress aigu. Quand un animal devient malade, est traumatisé ou effrayé, la concentration en glucocorticoïdes grimpe rapidement puis retourne à la normale. Il semble que pour les animaux sous restriction calorique, les glucocorticoïdes augmentent légèrement mais que leur niveau reste haut durant la vie entière de l'animal. Des chercheurs comme Jim Nelson au Texas et Ed Masoro prétendent que c'est la faible augmentation de la concentration des glucocorticoïdes pour les animaux sous restriction calorique qui les rend résistants aux maladies et à d'autres formes de stress qui pourraient être mortelles. C'est une idée intéressante mais rien n'est encore vraiment prouvé.

Question :

Le vieillissement a-t-il une contribution génétique ?

R. A. Miller :

Il y a beaucoup de contributions génétiques au vieillissement. Elles sont connues depuis longtemps. En termes quantitatifs chez les humains, les rats et les souris, la contribution des gènes à la longévité semble être de l'ordre de 20 à 30 % pour les populations naturelles ordinaires d'humains et pour les populations ordinaires d'animaux de laboratoire. Mais, c'est une statistique qui peut donner lieu à différentes fausses interprétations. La première chose à comprendre, c'est que la contribution génétique à la longévité inclut de nombreux gènes dont l'impact n'est pas du tout lié au vieillissement ; par exemple, des

¹ Professeur à l'Université du Michigan, USA

² Correspondant de l'Académie des sciences, Directeur de recherche au CNRS



gènes qui tuent dans la première année de la vie, ou dans les dix ou vingt premières années, parce qu'ils induisent des maladies infantiles. Elle comprend aussi beaucoup de gènes qui influencent la longévité en augmentant le risque d'attaques cardiaques ou de formes spécifiques du cancer, dans l'âge moyen ou chez des gens plus âgés. Tous ces gènes ont un effet sur la longévité mais ne concernent pas le processus du vieillissement proprement dit. On ne sait pas encore s'il existe une fraction du bagage génétique qui est associée avec des changements réels de la vitesse du vieillissement. Une autre manière de mal comprendre le problème est d'ignorer l'effet spectaculaire des différences génétiques sur la durée relative de la vie des espèces. Les différences de durée de vie, et les différences de vieillissement, entre les souris, les chiens, les chevaux et les hommes sont entièrement génétiques. Les différences dans les vitesses de vieillissement et l'espérance de vie de chacune de ces espèces sont bien plus importantes que les petites différences hypothétiques entre individus d'une même espèce.

Aujourd'hui, il est facile de fabriquer des souris qui vieillissent lentement. On connaît au moins six gènes uniques, spécifiques, qui peuvent ralentir le processus du vieillissement. Mais il n'y a pas là, en aucune façon, un guide qui puisse permettre de créer des humains avec des différences génétiques. Il y a juste des outils expérimentaux qui peuvent nous apprendre comment le vieillissement peut être ralenti, quels changements dans l'expression des gènes ou dans le nombre de cellules induisent une sénescence ralentie. Mais rien de tout cela ne va nous enseigner comment produire des bébés qui vont vivre 200 ans !

Question :

Croyez-vous que les résultats obtenus chez la souris peuvent être extrapolés à l'homme ?

R. A. Miller :

Je pense que c'est une question dont la réponse ne peut être exprimée sous la forme d'un "oui" ou d'un "non". Les études sur les souris et les rats ont été très utiles car elles nous ont donné des idées sur les processus physiologiques qui pourraient être sous contrôle génétique chez l'homme et elles ont indiqué quels processus physiologiques peuvent être manipulés par des médicaments chez l'homme. C'est une partie essentielle de la recherche médicale, mais il ne serait pas raisonnable d'admettre que tout ce que nous apprenons sur les souris et les rats s'applique aussi à l'homme. Par certains côtés, rongeurs et humains sont assez semblables. Le vieillissement du système immunitaire, des muscles, des fonctions cognitives, du cerveau, des fonctions cardiovasculaires sont assez similaires, mais il y a des maladies humaines spécifiques, telle que l'Alzheimer, qui n'existent pas pour les souris. Certaines maladies humaines comme l'athérosclérose ne se produisent chez les souris que dans des circonstances spéciales : il s'agit de souris transgéniques dont l'alimentation est particulière. Ainsi, il y a des choses à propos du vieillissement que nous ne pouvons pas apprendre d'un modèle animal et d'autres pour lesquelles nous pouvons risquer des extrapolations, mais seulement d'une manière très prudente.

Question :

Etes-vous optimiste sur la possibilité d'augmenter la durée de la vie humaine dans le futur ?

R. A. Miller :

Je crois qu'il est important de comprendre que les changements spectaculaires intervenus depuis un siècle sur la durée de la vie humaine n'ont pas été dus à des modifications touchant aux processus de vieillissement. Ils ont été largement produits par la réduction des risques de mort, notamment la diminution de la mortalité infantile et de la mortalité maternelle par exemple. On ne peut pas en espérer autant dans les cent prochaines années parce que les risques de mourir très jeune sont actuellement déjà voisins de zéro. Même des changements spectaculaires dans les risques associés aux maladies du vieil âge, prises une à une, auront des effets modestes sur l'espérance de vie d'un adulte. Si l'on considère une femme de cinquante ans par exemple, l'élimination complète du cancer, qui n'est pas du tout possible aujourd'hui, conduirait à allonger son espérance de vie d'environ seulement deux ou trois ans ! En

fait, l'éradication totale du cancer, des maladies cardiovasculaires et du diabète aurait un effet relatif faible et conduirait à un accroissement de la durée de vie de seulement de cinq à huit ans. S'il est un jour possible de ralentir le vieillissement, de créer des gens de cent ans aussi sains que les sexagénaires d'aujourd'hui, ce sera par quelque chose d'autre que l'approche spécifique des maladies prises une à une. Chez les souris et les rats, il a été possible, depuis cinquante ans maintenant, de créer des animaux qui sont vigoureux et sains à des âges équivalant à 120 ans chez l'homme. Il doit être possible de le faire en principe pour l'homme, mais pas avec des restrictions caloriques car ce n'est pas une approche réaliste chez l'homme, il a un trop fort besoin de satisfaire sa faim ! Toutefois, il est possible d'apprendre suffisamment sur le vieillissement, la restriction calorique et les gènes impliqués pour développer une stratégie acceptable, qui soit basée sur les gènes et les hormones ou sur des changements au niveau de l'appétit ou sur des changements dans l'expression des gènes qui permettront de faire la même chose.

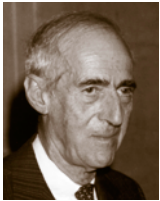
Je pense qu'il y a des raisons d'être optimiste aujourd'hui qui n'existaient pas il y a vingt ou trente ans. Dans n'importe quel laboratoire, c'est désormais une routine de créer des souris qui vieillissent plus lentement que les souris normales. Il doit être possible de faire la même chose pour d'autres mammifères. Cela ne nous dit pas comment le faire pour les hommes, mais c'est une preuve critique du principe en lui-même parce que cela indique que les chercheurs qui travaillent dans cette direction ne gaspillent pas leur temps. Il y a cinquante ans, c'était seulement une intuition de penser que le vieillissement pouvait être ralenti, mais maintenant, il est clair qu'en vérité on peut le faire, et chez les mammifères. La probabilité d'altérer le vieillissement chez l'homme dépend d'un certain nombre de choses, la plus importante étant la quantité d'argent à dépenser dans la recherche fondamentale sur le vieillissement. Nous avons entendu le ministre français de la Recherche nous expliquer que le gouvernement français s'apprêtait à dépenser beaucoup d'argent dans une recherche qui a été décrite comme liée au vieillissement mais qui, en fait, débloque des fonds pour étudier des maladies qui atteignent spécifiquement les gens âgés, telles que la perte d'équilibre, la décroissance des fonctions cognitives ou la dégénérescence neuronale. Bien sûr, il s'agit là de maladies terribles et importantes qui demandent qu'on s'en occupe et qu'on leur attribue des moyens. Mais, je crois qu'une bien meilleure stratégie serait de consacrer une partie substantielle de nos

ressources à comprendre les mécanismes fondamentaux en jeu dans le vieillissement, qui restent la clef de tout.

Si j'annonce aujourd'hui que j'ai trouvé une méthode qui permet de retarder d'un an et demi l'apparition des cancers chez les souris, ce qui est équivalent à cinquante ans chez l'homme, ce serait une grande nouvelle, d'un intérêt majeur pour le public et pour ceux qui décident de l'attribution des crédits de recherche. Et, il est effectivement possible de le faire chez les souris par changement génétique et restriction calorique. Et si j'ajoute, qu'en même temps cette méthode réduit aussi le développement de la cataracte et le déclin cognitif et ralentit le développement de la faiblesse musculaire et de la faiblesse immunitaire, je pense que ce ne sera pas seulement l'occasion de se réjouir, mais aussi une bonne raison pour agir. Ralentir le vieillissement signifie ralentir le développement d'une vaste gamme de maladies et d'évolutions dégénératives qui rendent la vie plus difficile pour des gens de 70, 80 ou 90 ans. Être capable de ralentir la vitesse du déclin serait un gain considérable et je ne vois pas comment y parvenir sans comprendre mieux ce qu'est le vieillissement pour pouvoir le contrôler.

Je trouve très triste que le monde en général n'ait pas encore compris l'importance de la recherche en biologie fondamentale du vieillissement pour améliorer la santé humaine et le bien-être. Même aux Etats-Unis, où des quantités de dollars affectés à ce type de recherche, la masse d'argent disponible est très faible : 0,06 % du budget du National Institute of Health ! Il y a un petit nombre de chercheurs en Europe qui font un magnifique travail mais, malheureusement, ils sont encore moins nombreux qu'aux Etats-Unis. Je pense que ce domaine est l'un de ceux qui méritent un soutien financier supplémentaire dans chaque pays du Monde parce que c'est celui qui a le potentiel le plus important pour se prémunir contre un très grand nombre de maladies et d'infirmités ■

Aspects médicaux et sociaux du vieillissement



Par **Maurice Tubiana**¹

L'allongement de la durée de vie a été le phénomène capital du ^{xx}e siècle. Associé à la baisse de la fécondité, il a bouleversé la structure démographique posant ainsi, des problèmes de santé physique, mentale et sociale. La prolongation de l'espérance de vie est le fruit de deux phénomènes : 1) une diminution spectaculaire depuis un siècle de la mortalité prématurée (avant 65 ans) particulièrement nette chez les femmes, moindre chez l'homme à cause des pathologies causées par le tabac, l'alcool et les traumatismes, 2) une moindre usure de l'organisme. Alors que l'espérance de vie des sujets de 65 ans avait peu augmenté de 1750 et 1950, elle s'est considérablement accrue au cours du dernier demi-siècle et continue de croître, comme en témoigne le nombre rapidement croissant de centenaires. Tout se passe donc comme si la sénescence avait été retardée ou ralentie.

A – Santé physique.

L'âge entraîne :

- une sénescence physiologique, processus dynamique qui atteint l'organisme à tous les niveaux, de la molécule d'ADN et de la cellule aux tissus et notamment le cerveau. Un programme génétique fixe la durée de vie des différentes espèces ; cependant ce programme est, dans certaines limites, influencé par les conditions de vie qui, comme le montre l'expérience de ces deux derniers siècles, peuvent accélérer ou ralentir ce processus. L'exemple des effets de l'irradiation solaire sur le vieillissement de la peau (rides, flétrissement, cancers) illustre l'influence d'agents exogènes. De même, la prévention de l'ostéoporose par un traitement hormonal substitutif montre l'influence des hormones. Une des conséquences du vieillissement est l'appauvrissement des tissus en cellules, particulièrement en cellules souches, ce qui ouvre la voie à des perspectives prometteuses pour

l'utilisation de ces cellules dans la prévention de plusieurs pathologies. Chez les rongeurs, la sénescence peut être ralentie par une restriction sévère de l'apport calorique, mais les connaissances actuelles, tout en soulignant les méfaits du surpoids, ne permettent pas de conseiller des régimes diététiques aussi sévères chez l'homme, (voir cf.R. Miller),

- des déficiences sensorielles (vision, ouïe) et de l'appareil locomoteur qu'il importe de rechercher et de corriger afin de maintenir l'autonomie, condition indispensable à un vieillissement harmonieux,
- l'organisme en vieillissant devient plus vulnérable, ses capacités de défense contre les agents infectieux diminuent, ce qui nécessite l'accroissement de précautions d'hygiène. On observe de plus un accroissement avec l'âge des maladies cardiovasculaires (dégéné-



rescence athéromateuse) et de quelques types de cancers "notamment ceux du sein, du colon et de la prostate", (voir cf. T. Turz). Des examens réguliers sont donc utiles pour surveiller, d'une part, la tension artérielle et, d'autre part, diagnostiquer précocement les cancers éventuels.

Sur le plan de la prévention, ce sont les mêmes mesures qui sont préconisées pour réduire le risque de ces différentes pathologies : conserver une activité physique régulière jusqu'à un âge très avancé (l'équivalent d'au moins 3,5 h / semaine de marche), éviter le surpoids, les déséquilibres alimentaires (régime hypercalorique ou riche en graisses notamment en graisses animales) et proscrire les intoxications tabagiques et alcooliques.

B – Santé mentale.

Elle a deux aspects :

- la dégradation des fonctions psychiques (notamment de la mémoire) est inconstante et peut être tardive. Par exemple, la prévalence de la maladie d'Alzheimer, qui est la plus fréquente des démences séniles, passe de 1 % à 70 ans à 15 % à 85 ans,
- les troubles du caractère : anxiété, agressivité, tendances dépressives. On ne sait ni éviter, ni retarder ces troubles psychiques.

Les médicaments psychotropes peuvent être utiles mais leur prescription doit être prudente car ils ont des effets nuisibles. Certaines données suggèrent que les fonctions intellectuelles baissent moins vite actuellement qu'il y a un demi-siècle, ce qui pourrait être dû à un meilleur niveau d'instruction et à la conservation d'une activité intellectuelle jusqu'à à un âge plus avancé. Le main-

Les universités du "temps libre", la garde des petits enfants par les grands-parents doivent être développés. Il faut enseigner aux personnes âgées les méthodologies modernes qui peuvent faciliter leur existence (informatique, télématique, télésurveillance, etc...) puisque l'expérience montre qu'elles peuvent se familiariser avec elles.

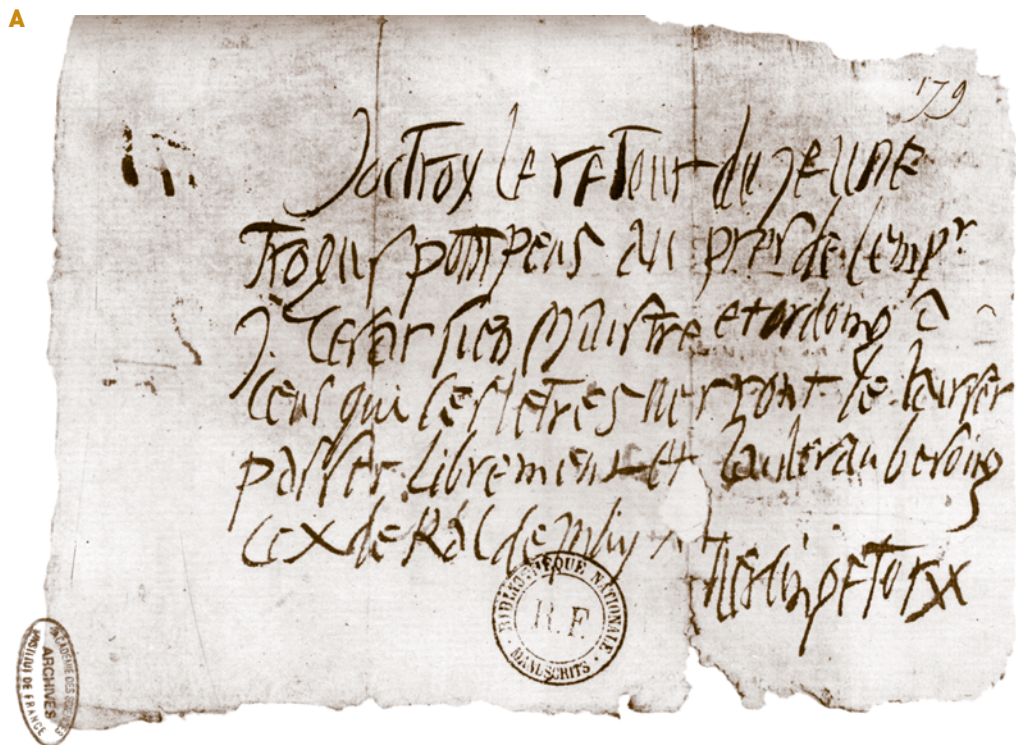
Il est souhaitable de maintenir la personne âgée aussi longtemps que possible à son domicile, en lui procurant les aides ménagères et les soins que son état nécessite. Quand la personne âgée est hébergée dans sa famille, il faut aider celle-ci, par exemple grâce à des hospitalisations temporaires quand les enfants s'absentent ou en cas de maladie. Le suivi à domicile requiert la collaboration de nombreuses disciplines médicales et sociales (médecins, gériatres, psychiatres, psychologues, assistantes sociales, infirmières, etc...); l'organisation de réseaux de soins, incluant des services hospitaliers, s'impose donc ; ceux-ci doivent être soumis à des cahiers des charges précis, des règles de contrôle de qualité et être évalués.

En conclusion : on peut prolonger la période d'autonomie et de vie sans handicap majeur. Mais ceci nécessite un quadruple effort :

- former le corps médical et les professionnels de santé à ces tâches nouvelles et faire coopérer étroitement les disciplines médicales et sociales,
- aider les familles et, plus généralement, informer la société puisque c'est de son attitude que dépend l'amélioration de la santé mentale et sociale des personnes âgées,
- développer les recherches scientifiques, médicales, psychologiques et sociologiques indispensables,
- apprendre à faire travailler ensemble des personnes de formations très diverses (médicales et sociales) mais dont les activités concourent au bien-être des personnes âgées.

Le bouleversement de l'équilibre démographique de la société moderne (en 2020 un tiers de la population aura plus de 60 ans), le poids inexorablement croissant de l'aide aux personnes âgées constituent un problème d'une gigantesque ampleur. On ne le résoudra pas par quelques mesures cosmétiques, il nécessite une réflexion approfondie et une stratégie à long terme ■

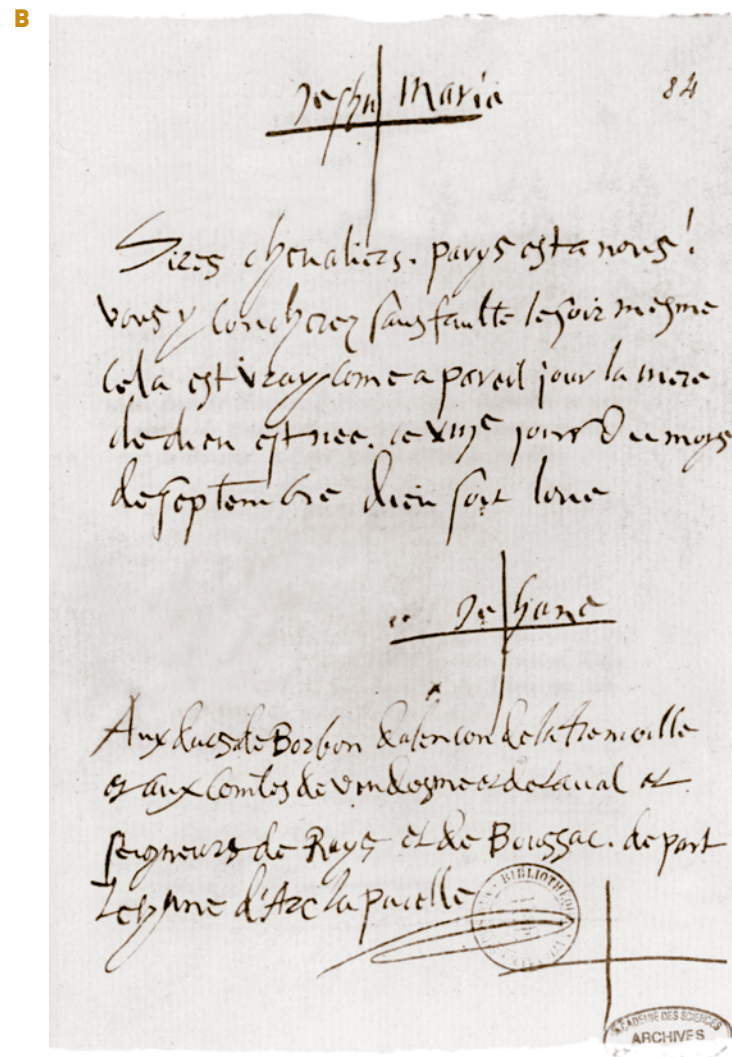
¹ Membre de l'Académie des sciences, Président de l'Académie nationale de médecine



A Ceci est la lettre de défiit qu'envoye Jules César à Vercingétorix, chef des Gaulois.

B Aux Parysiens de la part de Jehanne, dicte la Pucelle.

C Lettre de Charlemagne à son très docte et très amé Alcuin.



Mystification à

Par Jean-Paul Poirier²

Parmi les noms des soixante-douze savants français que Gustave Eiffel choisit d'immortaliser en leur attribuant un médaillon au premier étage de sa Tour de 300 mètres, on trouve celui de Michel Chasles (1793-1880), professeur de géométrie supérieure à la Sorbonne, membre de l'Académie des sciences depuis 1851, membre étranger de la Royal Society de Londres. La célébrité de Chasles, reconnu comme l'un des grands mathématiciens français du XIX^e siècle, était due à ses contributions importantes à la géométrie projective, plus qu'à l'élémentaire "relation de Chasles" bien connue des lycéens. En dépit de l'allure quelque peu sévère de ses portraits, Chasles était un homme généreux, qui participait activement à la "Société de secours des amis des sciences"; sa courtoisie était proverbiale et on ne lui connaissait pas d'ennemi. Mais, c'était aussi un collectionneur passionné d'autographes et cette pas-

sion fut la cause des ennuis qui assombrirent les dernières années de son existence.

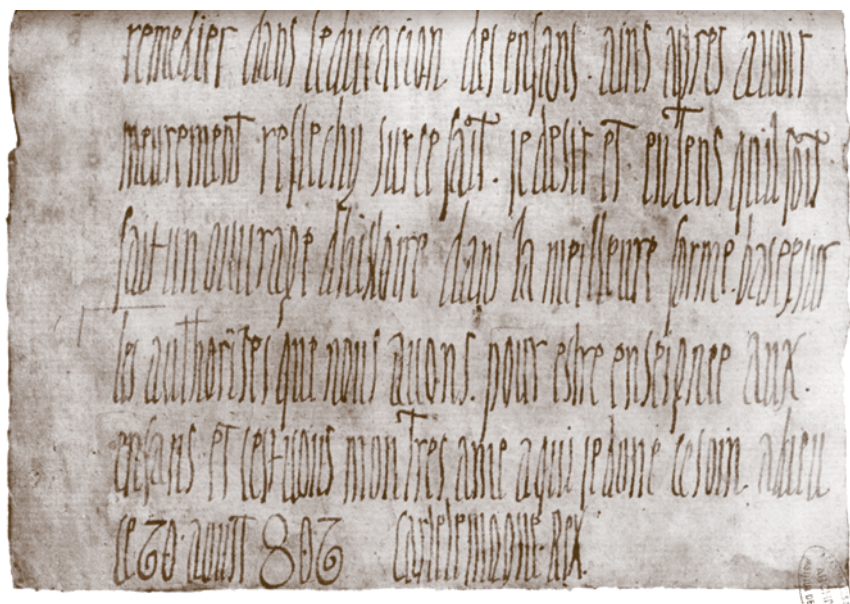
Chasles avait un jour mentionné à son ami, l'illustre chimiste Chevreul, qu'il possédait des lettres et des notes manuscrites de Pascal prouvant clairement que Pascal avait découvert les lois de la gravitation universelle avant Newton. A la séance du 15 juillet 1867, Chevreul, alors président de l'Académie, lui demanda s'il voulait bien "dire quelques mots de ce grand fait de science".

Le lundi suivant, Chasles montra à ses confrères deux lettres autographes et signées de Pascal, adressées à Boyle, ainsi que quelques notes jetées à la hâte sur des bouts de papier (ces documents, conservés à la bibliothèque de l'Institut, y furent exposés en 2001). Une de ces lettres commence par cette phrase: "Monsieur, dans les mouvements célestes, la force agissant en raison directe des masses et en raison inverse du carré de la distance suffit à tout et fournit des raisons pour expliquer toutes ces grandes révolutions qui animent l'univers. Rien n'est si beau selon moi". Et dans une note griffonnée, on trouve ces mots: "Les observations astronomiques apprennent que toutes les planètes se meuvent dans une courbe autour du Soleil; [...] Mais afin que ces grands corps décrivent cette courbe autour du Soleil, il faut qu'ils soient animés par une puissance qui fléchisse leur route en ligne courbe et qu'elle soit

dirigée vers le Soleil même. Et comme cette puissance varie toujours de la même manière que la gravité des corps qui tombent vers la terre, on doit conclure qu'elle n'est autre chose que la gravité même des planètes sur le Soleil. D'où il suit, suivant la théorie de la gravité, que la puissance de la pesanteur des planètes augmente comme le carré de la distance du Soleil diminue." Or Pascal était mort en 1662 et, si l'on en croit la légende, c'est pendant la grande peste de Londres, en 1666, que Newton aurait vu tomber la pomme, alors que le manuscrit des *Principia mathematica* est de 1686. Les documents exhibés par Chasles, dont certains étaient datés de 1652, montraient donc clairement la priorité de Pascal sur Newton. A l'époque, le grand public s'intéressait à la science et dans les quotidiens nationaux, un chroniqueur scientifique rédi-

¹ Cette chronique a fait l'objet d'un ouvrage publié aux éditions Le Pommier, Paris, 2001
² Correspondant à l'Académie des sciences, physicien à l'Institut de physique du globe de Paris

C



geait chaque semaine une rubrique rendant compte des séances de l'Académie des sciences. De nombreuses revues de vulgarisation s'intéressaient également à l'actualité scientifique. Mais que la découverte des lois de la gravitation universelle soit l'œuvre de Pascal, un illustre Français, et non d'un fils de la perfide Albion, dépassait de beaucoup le cadre de la science. On imagine donc comment la nouvelle fut reçue par les "patriotes". Parmi ceux-ci, l'abbé Moigno, bon mathématicien, rédacteur de la revue *Les Mondes, revue hebdoma-*

que la puissance qui anime les planètes vers le Soleil varie toujours de la même manière que la gravité des corps qui tombent vers la terre. Or, la valeur, trop faible, d'abord utilisée par Newton ne lui avait pas permis de prouver sa thèse et ce n'est qu'en 1682, quand il connut les résultats de l'abbé Picard, qu'il put achever ses calculs. Pascal était mort depuis vingt ans ! Malgré leur apparence ancienne, les lettres ne pouvaient pas être de Pascal. Chasles, blessé du soupçon, produisit à la séance suivante des lettres de Pascal

au petit Newton, alors âgé de onze ans, par lesquelles notre grand homme communiquait ses idées au jeune écolier. Newton, non content de perdre la priorité, devenait alors un plagiaire.

Duhamel ne trouva dans ces lettres aucun élément nouveau qui pût le faire changer d'avis.

D'un autre côté, pour Faugère, un littéraire spécialiste de Pascal, le style des lettres était loin d'avoir la limpidité de celui de Pascal et les signatures ne ressemblaient aucunement à la sienne. Les lettres étaient, selon lui, des faux malhabiles.

Ainsi débuta, dès le mois d'août 1867, une controverse qui devait durer deux pleines années, occupant quasiment toutes les séances de l'Académie. Les répercussions s'étendirent, évidemment à l'Angleterre, car le physicien Brewster, associé étranger de l'Académie et biographe de Newton, n'avait pas tardé à réagir, mais aussi à l'Italie et à la Hollande, car Galilée et Huygens furent appelés à la rescousse par Chasles.

S'appuyant sur des centaines de pages des Comptes rendus de l'Académie des sciences et sur des documents du "dossier Chasles" conservé aux archives de l'Académie, le livre raconte comment, lundi après lundi, les sceptiques donnaient des arguments astronomiques ou historiques, apparemment décisifs, contre la thèse de Chasles, et

brocardait avec verve l'Académie qui se laissait enliser dans cette ridicule histoire. Finalement, c'est l'astronome Le Verrier, découvreur de Neptune, et directeur fort contesté de l'Observatoire, qui joua le rôle d'un avocat général dans cette affaire. Au cours de plusieurs séances successives, dans l'été 1869, il fit un résumé fidèle des arguments *pro et con* et conclut que tous les documents produits étaient faux et que la gloire de Newton n'était pas entamée.

Chasles ne céda toujours pas, mais peu après, à la surprise générale, il annonça qu'il avait fait arrêter le faussaire. Celui-ci, qui prétendait avoir seul accès à la source des documents, les fabriquait au fur et à mesure des besoins, lorsque Chasles lui racontait naïvement les objections qui lui étaient faites.

Le procès du faussaire, en février 1870, fit salle comble. L'accusé, Vrain-Denis Lucas, sans profession, avait vendu à Chasles, pour une somme considérable, vingt-sept mille pièces, écrites en une sorte de vieux français sur du papier roussi artificiellement. A la grande joie du public, on apprit qu'en plus des lettres dont il avait fait état à l'Académie, le naïf mathématicien avait fait l'acquisition de lettres de Ponce-Pilate à Tibère, de Socrate à Euclide, de Judas Iscariote à Marie-Madeleine, de Christophe Colomb à Rabelais, d'Héloïse à Abélard, et de

à l'Académie des sciences

naire des sciences et de leurs applications aux arts et à l'industrie, fut l'un des plus enthousiastes.

Les académiciens, toutefois, accueillirent la grande nouvelle avec infiniment plus de réserve. Ils croyaient fermement que la science n'a pas de frontières et que si l'on voulait dépouiller de sa gloire Newton, d'ailleurs associé étranger de l'Académie, il fallait un peu plus que de vagues considérations qualitatives. Le physicien Duhamel, fut le premier à monter à l'assaut et à dire que les lettres ne prouvaient rien.

En effet, le mérite de Newton ne consistait pas à avoir énoncé que l'attraction était proportionnelle à l'inverse du carré de la distance, idée déjà fort répandue dans les milieux scientifiques de l'époque, mais bien plutôt d'avoir démontré mathématiquement les lois de Képler. Il fallait pour cela disposer de données d'observation dont Pascal ne pouvait pas avoir connaissance. En particulier, il était nécessaire de connaître le rayon de la Terre pour pouvoir affirmer



Michel Chasles (1793-1880)

comment celui-ci se défendait avec bec et ongles, faisant état à chaque fois de nouvelles lettres autographes de tout ce qui avait un nom dans le monde scientifique, littéraire et politique des XVII^e et XVIII^e siècles qui répondaient en détail aux objections soulevées, formant un formidable faisceau de preuves à charge contre Newton.

Les physiciens et astronomes de l'Académie, sceptiques de la première heure, ne trouvaient pas de réponses à leurs arguments scientifiques dans ces documents qui arrivaient si fort à propos et dont l'abondance leur semblait suspecte, mais la discussion se prolongeait, car le sentiment général des académiciens était que l'on devait écouter jusqu'au bout un confrère respecté et aimé. La presse nationale et les revues de vulgarisation se faisaient, en général, l'écho des sentiments patriotiques et, à l'instar de l'enthousiaste abbé Moigno, en tenaient pour Pascal. Par contre, mais il était relativement isolé, le talentueux Wilfrid de Fonvielle, chroniqueur de *La Liberté*,

bien d'autres tout aussi improbables. Alphonse Daudet s'inspira de l'affaire pour son roman "L'immortel".

Lucas, cet autodidacte génial, qui avait dû travailler sans relâche pour fabriquer autant de documents, fut condamné pour escroquerie à deux ans de prison. On pourrait certes se demander comment un grand savant pouvait être aussi naïf, mais ce serait oublier que la passion ne connaît pas la raison, et les autographes étaient la passion de Chasles. Pour le public chauvin, il n'était que trop vraisemblable qu'un Anglais eût encore une fois piraté l'œuvre d'un Français, et il n'était que justice de rétablir la vérité.

Mais il faut noter que la fierté nationale ne joua aucun rôle à l'Académie, et lorsque le Secrétaire perpétuel Jean-Baptiste Dumas mit fin à cette pénible discussion, ce fut pour assurer que Newton n'avait rien souffert de cette tentative, ni dans sa gloire, ni surtout dans sa dignité ■

De
grands progrès ont été accomplis
récemment dans l'étude des neutrinos, ces parti-
cules aux propriétés encore peu élucidées et dont la détec-
tion défie l'imagination des physiciens. Les neutrinos jouent un
rôle capital depuis l'échelle microscopique avec la désintégration des
noyaux radioactifs jusqu'à celle de l'univers tout entier. La mise en évidence
de leur masse, qui se révèle être minuscule, ouvre de fait une fenêtre sur des
phénomènes à très haute énergie qui sont pour l'instant inaccessibles directement.

Les neutrinos, omniprésents et insaisissables



Par Michel Davier¹

Un défi pour les expérimentateurs

Jusqu'à une échelle spatiale de 10^{-18} mètre, limite de la résolution expérimentale actuelle, la matière est formée de particules élémentaires : les quarks et les leptons. Si les quarks sont les constituants des particules soumises principalement à l'interaction forte, les leptons n'y sont pas sensibles et leurs propriétés découlent de l'effet des interactions électromagnétique et faible. Les leptons sont soit chargés électriquement, comme l'électron et le muon, soit neutres, comme les neutrinos. De ce fait, ces derniers n'interagissent avec les autres particules que par la force d'interaction faible, ce qui leur confère la redoutable propriété d'être pratiquement insaisissables : il faut pour les détecter des appareils de très grande masse, ou bénéficier de flux intenses, ou souvent

¹ Membre de l'Académie des sciences, Professeur à l'Université Paris-Sud Orsay

les deux à la fois. Pour fixer les idées, un neutrino d'énergie 1 GeV créé dans l'atmosphère terrestre par l'interaction de rayons cosmiques a une probabilité de seulement 10^{-4} d'interagir lorsqu'il traverse un diamètre terrestre !

Cette difficulté de détection des neutrinos a rendu les progrès expérimentaux dans ce domaine plutôt lents. Si le neutrino a été "inventé" par Pauli dès 1931 pour expliquer le spectre en énergie des électrons émis dans la radioactivité β des noyaux, sa mise en évidence expérimentale par Reines et Cowan n'a eu lieu qu'en 1953. Il s'agissait alors du neutrino associé à l'électron. L'existence de deux types de neutrinos, l'un associé à l'électron, l'autre au muon a été prouvée en 1962 par l'équipe de Lederman, Schwartz et Steinberger. Et c'est l'an dernier seulement que le neutrino associé au troisième lepton chargé connu, le lepton τ , a été mis en évidence de façon directe.

Trois neutrinos distincts

Un des grands succès expérimentaux de ces dernières années est la détermination du nombre de types de neutrinos. Ce résultat majeur a été obtenu par les expériences sur l'anneau de collisions électron-positron LEP du CERN en observant environ 16 millions de désin-

tégrations du boson Z^0 , le médiateur avec les bosons W de l'interaction faible. La plupart de ces désintégrations conduisent à un état final où les particules sont facilement détectables, mais une partie significative d'entre elles produit des paires neutrino-antineutrino qui échappent aux détecteurs. Par une méthode très élégante basée sur les concepts mêmes de la mécanique quantique, le nombre de types de neutrinos N_ν supposés être couplés de manière standard au boson Z^0 peut être déterminé. La qualité de cette mesure s'est considérablement améliorée dans le temps grâce au développement de nouveaux éléments de détecteur et à de nouvelles méthodes de mesure de l'énergie des faisceaux par dépolarisation résonnante. La valeur finale, $N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083$, établit sans équivoque l'existence de trois types de neutrinos et, du fait de sa précision, prouve l'hypothèse d'universalité des couplages.

Ce résultat est d'une grande importance dans la mesure où il place une borne à la structure en familles des quarks et de leptons : trois et seulement trois familles, chacune comprenant un doublet de

quarks et un doublet de leptons. Mais il a aussi des retombées en cosmologie ! En effet, la valeur de N_ν influe sur la dépendance en température de l'univers primordial et donc sur la synthèse des noyaux légers à partir des protons et neutrons libres. Or on sait depuis plus d'une dizaine d'années que le modèle cosmologique standard et la mesure de l'abondance des éléments tels que l'hydrogène et l'hélium montrent que la valeur de N_ν est 3 ou 4. La mesure de LEP peut donc être vue comme une confirmation du modèle cosmologique du big-bang. Finalement, remarquons que la structure des quarks et des leptons en trois familles est une découverte expérimentale, non prédite et encore inexpliquée par la théorie : si le Modèle Standard des interactions forte et électrofaible rend compte des propriétés relatives des quarks et des leptons à l'intérieur de chaque famille, il ne dit rien sur leur multiplicité qu'il traite comme des répliques "mises à la main" de la première famille.

L'énigme posée par les neutrinos solaires

La difficulté de détection mentionnée plus haut a conduit les physiciens à imaginer des expériences mettant en jeu des sources intenses de neutrinos. Ainsi, des étapes importantes ont-elles

été franchies par l'utilisation des réacteurs nucléaires, la mise en œuvre de faisceaux concentrés de neutrinos produits avec des accélérateurs de particules. Mais des progrès décisifs ont été obtenus ces dernières années en se tournant vers des sources naturelles cosmiques. D'une part, des flux intenses de neutrinos sont émis par les étoiles, soit en régime permanent grâce aux réactions de fusion thermonucléaire qui entretiennent leur combustion, soit à la fin de leur vie lorsqu'elles s'effondrent et explosent en supernovae. D'autre part, les rayons cosmiques primaires, constitués de protons et de noyaux légers, interagissent avec la haute atmosphère terrestre, produisant une gerbe de particules secondaires dont les produits de désintégrations contiennent des neutrinos en abondance. Comme nous allons le voir, ces deux approches ont apporté des informations considérables sur le problème de la masse des neutrinos.

Du fait de sa relative proximité, le Soleil est une source de neutrinos privilégiée pour l'expérimentation. Les réactions de fusion produisent un flux soutenu et intense de neutrinos du type électron, de l'ordre de 10^{15} par m^2 de surface terrestre et par seconde, pour des énergies supérieures à 100 keV. Ces réactions forment un cycle, maintenant très bien connu, dont le rôle dans la production de neutrinos peut se ramener globalement à une transmutation des protons en neutrons. La mesure de ce flux sur Terre a été engagée depuis 1967 par le physicien américain Davis au moyen d'une réaction où les neutrinos transmutent des noyaux de chlore-37 en argon-37, ces derniers pouvant être signés un par un lors de leur désintégration radioactive ultérieure. Cette expérience radiochimique constitua à l'époque une prouesse technique : elle mettait en jeu 600 tonnes de trichloréthylène, placés à 1500 m de profondeur dans une mine d'or désaffectée pour se débarrasser du bruit de fond des rayons cosmiques, et conduisit à la détection d'environ une désintégration d'argon-37 par semaine. Le résultat fut à la mesure de l'effort : le flux mesuré était environ un tiers du flux calculé par Bahcall. Il importait donc de confirmer le résultat expérimental et de s'assurer de la validité des prédictions théoriques. Cette double démarche a rythmé les progrès récents dans ce domaine.

Tout d'abord, le déficit apparent de neutrinos solaires a été confirmé par de nombreuses expériences ultérieures. Parmi celles-ci, l'expérience européenne GALLEX dont le choix du gallium-71 permettait d'accéder à des neutrinos d'énergie beaucoup plus faible grâce à son seuil à 230 keV. Les expériences Kamiokande et surtout SuperKamiokande au Japon ont ouvert une nouvelle

voie, celle de la détection en temps réel des neutrinos solaires par le biais des électrons produits par diffusion élastique dans d'immenses réservoirs d'eau purifiée fonctionnant comme des détecteurs de rayonnement Cerenkov. Outre le fait qu'ils sont basés sur des principes de détection complètement différents, les résultats obtenus par l'ensemble de ces expériences permettent de consolider une image cohérente de l'émission de neutrinos solaires, avec des informations complémentaires sur le spectre en énergie et sur la variabilité potentielle du flux en fonction de l'activité solaire. D'un autre côté, les prédictions théoriques se sont considérablement affinées. Une difficulté réside dans l'extrême sensibilité à la température de certaines réactions nucléaires dans le Soleil. Cependant ces ambiguïtés ont pu être levées par des mesures sur les modes de vibrations du Soleil. L'observation de raies spectrales à la surface du Soleil a permis la mise en évidence des oscillations propres de celui-ci. La sismologie solaire a donc apporté un soutien de poids au modèle solaire standard et par là-même validé les prédictions sur le flux de neutrinos solaires. Le déficit observé représente donc la première énigme à laquelle nous sommes confrontés.

Le problème des neutrinos atmosphériques

La détection des neutrinos issus des interactions de rayons cosmiques dans l'atmosphère terrestre a apporté une nouvelle énigme. De quoi s'agit-il ? De manière très générale, on s'attend à ce que ces interactions, suivies par les désintégrations des particules secondaires produites, conduisent à un rapport égal à 2 entre les nombres de neutrinos de type muon (ν_μ) et ceux de type électron (ν_e), ceci tenant au fait que les mésons π produisent pratiquement uniquement des neutrinos ν_μ et des muons, chacun d'entre eux se désintégrant en électron, un neutrino ν_μ et un neutrino ν_e (sans distinguer ici entre neutrinos et antineutrinos). Comme il s'agit ici d'un rapport, la prédiction théorique est robuste et dépend peu des modèles utilisés pour décrire les gerbes cosmiques dans l'atmosphère.

Les expériences installées dans des laboratoires souterrains détectent les interactions induites par les neutrinos par les particules produites. Ainsi l'interaction d'un ν_e s'accompagne-t-elle d'un électron, alors que celle d'un ν_μ se caractérise par l'apparition d'un muon. Cette signature expérimentale claire permet une excellente séparation des deux types d'événements.

A la surprise générale, les mesures effectuées dans l'expérience SuperKamiokande, et confirmées depuis par d'autres groupes, montrent un déficit très net de neutrinos ν_μ par rapport aux neutrinos ν_e . En fait, le flux absolu de ν_e est en bon accord avec la prédiction des modèles théoriques de gerbes, mais c'est le taux de neutrinos ν_μ qui est réduit. De plus, et c'est l'aspect sans doute le plus intéressant de ce problème, le taux de réduction varie très significativement suivant la direction d'arrivée du neutrino, estimée par celle du muon détecté : les neutrinos ν_μ produits au zénith, c'est-à-dire à environ 10-20 km du détecteur ont un flux normal, alors que ceux en provenance de l'atmosphère aux antipodes et ayant traversé (sans peine) 13000 km sont fortement réduits par rapport au flux théorique. Deuxième énigme de taille posée par les neutrinos!

Des neutrinos massifs et oscillants

Il existe une solution élégante aux deux énigmes que nous posent les neutrinos solaires et atmosphériques et qui est basée sur le fait que ces neutrinos ont une masse. Ceci n'est pas surprenant en soi, les particules étant en général massives. Dans le cas des neutrinos, les mesures directes de leur masse ont toujours donné des limites inférieures et l'habitude avait été prise de les considérer comme ayant une masse nulle. Cependant, alors que la masse nulle du photon est dictée par l'invariance de jauge de la théorie électromagnétique, aucun principe général ne semble exiger que les neutrinos soient sans masse. Néanmoins leur masse est certainement très faible au regard de celle des particules auxquelles ils sont associés : les mesures les plus précises actuellement donnent pour le neutrino ν_e une masse inférieure à $3 \text{ eV}/c^2$ environ, une valeur

déjà plus de 10^5 fois plus faible que la masse de l'électron.

Comment donc expliquer les anomalies observées si les neutrinos ont une masse ? En fait, il faut non seulement qu'ils soient massifs, mais que les trois espèces de neutrinos aient des masses différentes. Il se produit alors un phénomène d'oscillations entre les trois types lors de leur propagation. Ce phénomène de nature purement quantique est à l'œuvre lorsqu'un système physique fait intervenir plusieurs bases d'états propres. Dans le cas des neutrinos, il faut distinguer la base des états propres de masse et celle des états propres de l'interaction faible. La première base (ν_1, ν_2, ν_3) est appropriée pour décrire la propagation où la fonction d'onde de chaque état s'exprime alors simplement. La seconde est la base habituelle des trois types de neutrinos définis en relation avec les leptons chargés correspondants, soit (ν_e, ν_μ, ν_τ). Mathématiquement, il existe une matrice unitaire 3 par 3 pour passer d'une base à l'autre, cette matrice dite de mélange dépendant en général de 4 paramètres : 3 angles d'Euler et une phase. Un état ν_e produit dans le Soleil va se comporter comme une superposition linéaire des trois états de masse, chacun se propageant dans l'espace avec sa fonction d'onde oscillante propre gouvernée par sa masse. Les différentes composantes vont donc progressivement se déphaser les unes par rapport aux autres, avec le résultat que l'état initial ν_e n'est pas préservé et que des composantes ν_μ et ν_τ apparaissent. On peut montrer que le phénomène est caractérisé par une longueur, dite longueur d'oscillation, dépendant des différences entre les carrés des masses propres et des angles de la matrice de mélange.

D'autres effets dus aux différentes probabilités d'interaction des neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) semblent jouer un rôle important lorsque les neutrinos se propagent dans la matière, par exemple à l'intérieur du Soleil. Il se trouve que les résultats expérimentaux discutés précédemment s'expliquent parfaitement par ces phénomènes d'oscillations dont les masses des neutrinos sont à l'origine. De plus, un certain découplage semble se produire dans la matrice de mélange, de telle sorte que l'on peut pratiquement rendre compte des observations par deux matrices 2 par 2, chacune avec un angle de rotation voisin de 45° , correspondant à un mélange maximal. C'est ainsi que les neutrinos ν_e émis par le Soleil oscillent en partie vers des neutrinos ν_μ qui interagissent très peu avec les détecteurs car leur énergie est bien inférieure à celle nécessaire pour produire des muons. Cette conversion de ν_e en ν_μ va être prochainement testée grâce à une nouvelle expérience en fonctionnement au Canada, SNO, qui a été

conçue pour la détection directe des neutrinos ν_μ sur les noyaux de deutérium présents dans un grand volume d'eau lourde. La mesure d'un flux de ν_μ exactement complémentaire de celui de ν_e apportera alors la preuve irréfutable de l'existence des oscillations. Les résultats préliminaires de SNO vont d'ailleurs dans ce sens.

Dans le cas des neutrinos atmosphériques, avec en complément des résultats obtenus auprès d'un réacteur de la centrale de Chooz, l'explication réside dans une oscillation $\nu_\mu - \nu_\tau$, avec réduction du flux de ν_μ et apparition d'un flux de ν_τ qui est malheureusement "stérile" dans les conditions de l'expérience, comme dans le cas des neutrinos solaires. Des vérifications sont en cours pour établir sans l'ombre d'un doute ce mécanisme. Depuis un an, un faisceau de neutrinos fourni par le synchrotron KEK près de Tokyo est dirigé à 250 km de là sur le détecteur SuperKamiokande pour confirmer la réduction du flux de ν_μ dans des conditions mieux contrôlées que pour les neutrinos atmosphériques. Ce projet vient malheureusement de subir un revers important à cause de l'implosion en chaîne d'un grand nombre de photomultiplicateurs qui tapissent la cuve Cerenkov et le détecteur devra être reconstruit. Enfin dans quelques années un faisceau issu du CERN sera pointé vers le laboratoire souterrain du Gran Sasso distant de 730 km. L'énergie des neutrinos sera suffisamment élevée pour permettre l'observation directe des neutrinos ν_τ , apportant ici aussi la preuve définitive.

Quelles masses pour les neutrinos ?

L'interprétation des résultats récents en termes d'oscillations entre différents types de neutrinos fournit des valeurs pour les différences des carrés des masses correspondantes. Plusieurs solutions existent pour les neutrinos solaires avec Δm^2 de 10^{-5} à 10^{-10} (eV/c²)². Dans le cas des neutrinos atmosphériques, la solution est unique et fournit la valeur $\Delta m^2 = (2.8 \pm 0.8) 10^{-3}$ (eV/c²)². Malgré ces résultats spectaculaires le spectre de masse absolue des neutrinos est encore inconnu. On peut encore considérer à ce stade deux scénarios extrêmes : l'un où les neutrinos sont pratiquement dégénérés en masse, avec une valeur pouvant atteindre la limite expérimentale directe de 3 eV/c² ; l'autre avec un spectre de masse très étalé, où le neutrino le plus lourd "pèse" 60 meV/c². Dans le premier cas, l'énergie de masse des neutrinos joue un rôle cosmologique, par exemple dans la formation des grandes structures de galaxies. Le second cas, peut-être plus naturel, conduit à des masses minus-

cules pour les neutrinos. La distinction entre les deux scénarios ne peut se faire qu'à travers la mesure absolue des masses de neutrinos. Plusieurs approches sont possibles : l'extension de la méthode utilisant la mesure du spectre en énergie des électrons dans la désintégration β près de la limite cinématique, ou l'observation de la désintégration $\beta\beta$ sans neutrinos de certains noyaux, ou alors la mesure du temps de vol des neutrinos prompts émis par une supernova chronométrés par le rayonnement synchrone d'ondes gravitationnelles.

On peut s'interroger sur l'origine de l'extrême petitesse de la masse des neutrinos. Une explication a priori paradoxale a été proposée : ceci pourrait provenir de l'existence d'une très grande échelle de masse M, caractéristique de nouveaux phénomènes et qui fournirait pour les neutrinos des masses de l'ordre de m^2/M où m est la masse du lepton chargé correspondant. Il est facile de constater que les valeurs possibles pour M sont bien au delà des énergies actuellement disponibles avec les accélérateurs et, si ce mécanisme était vérifié, la mesure des masses de neutrinos pourrait apporter des informations précieuses et vraiment uniques sur des phénomènes de très haute énergie. Cette perspective justifie pleinement les efforts expérimentaux déployés sur de nombreux fronts afin d'élucider les derniers mystères des neutrinos ■

"Objets inanimés, avez-vous donc une âme ?", demandait le poète. Sans vouloir répondre à sa place, on serait tenté, à la lumière de la science des matériaux, de lui recommander d'intégrer dans sa réflexion le fait que les



matériaux qui constituent ces "objets inanimés" ont leur façon propre de naître et de mourir et, dans l'intervalle, de vieillir... Certes, la "vie" ne se manifeste pas chez eux avec la vigueur et la splendeur qui marquent le règne animal ou végétal ; leur vieillissement n'est pas lié à la perturbation progressive ou au ralentissement des cycles merveilleux qui entretiennent la flamme vitale et s'effectue selon un rythme souvent plus lent et, à coup sûr, moins spectaculaire ; mais ils subissent tout autant des ans l'irréparable outrage, par la mise en jeu implacable de mécanismes obéissant aux mêmes grandes lois de la nature. Un anthropomorphisme de bon aloi n'a-t-il d'ailleurs pas inspiré à l'ingénieur un vocabulaire technique évocateur : vieillissement, bien sûr, mais aussi pathologie, perte d'endurance, réduction de durée de vie, voire perte de mémoire ou fatigue ?... Au commencement, il y a ce péché originel : les matériaux ont été fabriqués

et mis en service dans un état qui n'est jamais vraiment un état d'équilibre thermodynamique. Si même il l'était, il ne le serait que relativement aux conditions de température, de pression et d'environnement qui ont présidé à l'élaboration et ne seront plus celles de leur utilisation. D'où une force motrice implacable, engendrée par ce déséquilibre thermodynamique, qui agira inéluctablement pour le réduire en modifiant l'architecture intime de la matière et les propriétés dont elle est responsable : c'est le vieillissement.

Le "vieillissement thermique"

Il y a, bien sûr, ces évolutions spectaculaires qui suivent immédiatement la naissance de certains matériaux, qu'on pourrait dire prématurée : le polymère qui vient d'être synthétisé, le métal qui vient de se solidifier ou le béton "jeune" qui vient d'être coulé n'ont pas encore les propriétés qu'on attend d'eux. Que la polymérisation de la matière plastique ou de la colle continue de se faire, que,

activés se mettent inexorablement en marche pour modifier la répartition des constituants et la distribution, la densité, voire la nature des défauts intimes de constitution qui régissaient ses propriétés d'usage initiales. Dans quel sens évolueront-elles ? Parfois dans un sens bénéfique (les vins se bonifient en vieillissant ; il y a aussi des matériaux fissurés qui "cicatrisent" avec l'âge !), le plus souvent cependant dans celui de leur dégradation, les microstructures initiales ayant été optimisées pour l'utilisation visée : raidissement, fragilisation, opacification, etc. On parle alors de "vieillissement thermique" car, derrière le temps, responsable apparent, se cache la toute-puissante température et sa manière de régir l'activation thermique, la vraie coupable, et son obscur travail de sappe.

Les mécanismes par lesquels agit le vieillissement thermique sont innombrables ; l'un des plus étudiés dans les matériaux métalliques est celui de la précipitation et de son évolution temporelle. Prenez un bel et bon acier inoxydable, aux apparences trompeuses d'immuabilité et d'insensibilité au temps qui

ment déplacées et agglomérées pour former des précipités, généralement durs et cassants, mal liés à la matrice, et qui sont de ce fait des sources potentielles d'endommagement.

Dans d'autres conditions, on pourra assister à la formation d'une grande densité de très petites particules, cette fois de taille nanométrique, ce qui durcit le matériau mais, du même coup, le fragilise et, concurrentement, de manière encore plus pernicieuse car se produisant à plus basse température, à des fluctuations spatiales de la composition chimique de la matrice en fer et en chrome, capables de s'amplifier : cette "décomposition spinodale" se laisse aujourd'hui analyser à la lumière de la théorie des systèmes dynamiques et des instabilités, de sorte qu'elle peut être combattue dès la conception. Un autre mécanisme de vieillissement dans les matériaux métalliques est celui de la "ségrégation" de certains atomes dans les zones les plus accueillantes, comme le sont souvent les joints de grains où, à cause de la désorientation des réseaux des grains adjacents, l'arrangement périodique des atomes est fortement

ont, au contraire du biologiste ou du médecin, toute latitude pour modifier d'emblée les conditions et les rythmes du vieillissement et en utiliser les mécanismes pour améliorer leurs "espèces". Ainsi de l'influence, dans certains alliages, du grossissement des précipités par vieillissement sur leur limite d'élasticité (de petits précipités cohérents peuvent être aisément cisailés par les dislocations, ces défauts linéaires d'empilement cristallin dont la multiplication et le déplacement régissent la plasticité, alors que d'autres mécanismes sont mobilisés pour de gros précipités incohérents) : ces mécanismes peuvent être mis à profit dès l'élaboration du matériau, par exemple par des traitements thermiques visant à obtenir une taille et une répartition optimales de ces précipités, correspondant au "pic de vieillissement" (on parle même, au-delà de ce pic, de "survieillissement", qui peut être favorable à l'utilisation ultérieure). Dans le même esprit, l'observation des effets du vieillissement ayant opéré sur les roches sur des durées géologiques peut être une source précieuse d'information, dont ne dispose guère le biolo-

Les matériaux vieillissent aussi...

Par André Zaoui¹

par un traitement thermique approprié, le métal voit une microstructure adéquate s'établir et se stabiliser, que les mécanismes d'hydratation du ciment progressent suffisamment pour que la prise se fasse et ces matériaux auront vite atteint l'âge adulte. Là commence alors pour eux le véritable vieillissement : les mécanismes qui avaient dominé le jeune âge et semblaient éteints continueront à jouer lentement et d'autres se mettront en route. Extérieurement, rien n'y paraît mais, à l'échelle fine de leur constitution interne, les structures initiales évoluent dans le temps et les propriétés d'usage en font autant : si basse que soit la température d'utilisation, elle n'atteint pas le "zéro absolu" et des mécanismes thermiquement

perturbé : la cohésion des joints de grains peut s'en retrouver très altérée et la tenue globale du matériau à la rupture amoindrie. Là encore, le métallurgiste, instruit des risques, saura préconiser une plus grande pureté du matériau ou de nouvelles additions, défavorables à la ségrégation.

passé, et réchauffez-le suffisamment longtemps de quelques centaines de degrés, puis observez-le au microscope électronique : vous y verrez, à l'intérieur des grains, ces petits cristaux micro-métriques qui le constituent, une répartition assez régulière de nouvelles petites particules, d'une taille de quelques dixièmes de micromètre et d'une composition chimique qui n'a rien à voir avec celle de la "matrice" qui les entoure. Elles sont nées dans ces cristaux et ont crû peu à peu, en consommant diverses espèces chimiques présentes dans l'acier, comme le fer et le carbone, qui en sont les constituants de base, mais aussi le chrome et quelques autres éléments d'addition sans lesquels cet acier n'aurait pas ses vertus d'inoxidabilité : leur concentration ayant, aux températures considérées, dépassé leur limite de solubilité dans le matériau et leur diffusion ayant été rendue possible, elles se sont progressive-

Maîtriser le vieillissement

On perçoit ici une différence notable entre vieillissement des matériaux et vieillissement biologique, non pas tant pour ce qui est des causes profondes et des mécanismes, mais pour ce qui relève des remèdes possibles contre le vieillissement. Entièrement maîtres de l'élaboration et de la conception, libres de surcroît de toute préoccupation bioéthique ou de tout soupçon d'eugénisme, le chercheur et l'ingénieur en matériaux

giste. Il en va de même de la possibilité de conduire des essais "accélérés", conçus pour étudier sur des temps courts les phénomènes et mécanismes de vieillissement à long, voire à très long terme, en soumettant les matériaux à des sollicitations plus sévères (typiquement à des températures plus élevées) que celles correspondant au domaine d'utilisation : on peut ainsi dégager, à partir d'observations sur des durées accessibles à l'expérience, des règles d'extrapolation permettant de prévoir les effets du vieillissement à long terme sous sollicitations moindres. Séduisante dans son principe, cette problématique peut cependant s'avérer fallacieuse. Elle n'est en effet pleinement justifiée que si un seul mécanisme de vieillissement

¹ Correspondant de l'Académie des sciences, Professeur à l'École polytechnique.

thermique, obéissant à une loi d'activation bien définie, telle la loi d'Arrhenius, qui exprime une certaine équivalence entre le temps et la température, est à l'œuvre. Que plusieurs mécanismes soient simultanément actifs, chacun avec sa propre énergie d'activation, qu'ils n'apparaissent que dans certains domaines de température ou, pire encore, que le vieillissement soit simultanément régi par d'autres paramètres que la seule température et tributaire d'effets de synergie échappant à une simple règle de cumul et la logique des essais accélérés sera totalement compromise : elle ne saurait alors dispenser de l'identification délicate et laborieuse des diffé-

rents mécanismes élémentaires, de leur cinétique et de leurs domaines d'action respectifs.

D'autres façons de vieillir...

Par extension, on parle encore de vieillissement lorsque, sous l'effet de diverses sollicitations, des évolutions structurales lentes se produisent, provoquant une modification progressive des propriétés d'usage. Il règne à partir de là une certaine part d'arbitraire. Le métallurgiste ne parlera de vieillissement que si les modifications structurales concer-

nées se font aux échelles fines dont il est coutumier : effets d'une irradiation aux neutrons ou au rayonnement ultraviolet, action de l'humidité sur les polymères, par hydrolyse ou par diffusion des molécules d'eau entre les chaînes ou à l'interface avec les fibres d'un composite. Le physico-chimiste se souciera de "vieillesse chimique" des polymères, d'hydratation ou de déshydratation des bétons, de certaines formes de corrosion dans un environnement agressif... Autant alors adopter un point de vue phénoménologique ne préjugant pas des échelles concernées par les mécanismes en jeu et étendre la notion de vieillissement à tout processus d'évolution structurale imperceptible à l'échelle de l'utilisation mais se traduisant par une modification lente et progressive des propriétés d'usage, jusqu'à leur franche manifestation macroscopique. Une vitre de verre se casse instantanément, de manière fragile, sous l'effet d'un choc d'intensité suffisante : il n'est guère question de vieillissement ; mais une bielle de moteur ou une aube de turboréacteur, soumise à un chargement mécanique cyclique, peut tenir magnifiquement pendant des millions de cycles et, brutalement, se rompre pour quelques cycles de trop. Ce n'est pas par l'effet de quelque soudain maléfice ; tout a en fait commencé très tôt, de manière longtemps imperceptible : à partir d'un défaut microscopique, souvent en surface, des microfissures se sont formées peu à peu, certaines se sont rassemblées en une fissure plus importante qui, cycle après cycle, s'est lentement propagée jusqu'à atteindre enfin une dimension telle qu'elle pouvait provoquer une rupture brutale.

On parle alors de "fatigue", cause courante de rupture différée : la pièce avait été dimensionnée pour supporter, sur de courtes durées, le chargement prévu, à partir d'une bonne connaissance de la résistance à la rupture instantanée du matériau constitutif ; elle n'en était pas moins capable de "se fatiguer" et de "vieillir" sous l'effet de la répétition des efforts appliqués ou de leur maintien prolongé, jusqu'à la rupture fatale. Ceci est maintenant bien connu et, surtout s'il dispose d'instruments performants de contrôle non destructif en service, l'ingénieur peut concevoir ses pièces en fonction de la "tolérance au dommage" du matériau, évaluer à tout moment leur "durée de vie résiduelle" et intervenir pour la prolonger ; mais tout n'est pas encore maîtrisé dans ce domaine, notamment quand il s'agit de chargements aléatoires mal caractérisés, de sollicitations multiaxiales complexes ou de matériaux très hétérogènes, comme les composites.

Ainsi compris, le vieillissement est omniprésent et régit l'essentiel des propriétés de durabilité des matériaux et des struc-

tures. La variété de ses origines n'a alors d'égale que celle des mécanismes en jeu et des échelles concernées. Sans entrer dans le détail de cette diversité, qui nourrit le développement de puissants moyens de simulation numérique et d'analyse physique et chimique, on peut en deviner la complexité en évoquant le cas de la corrosion sous tension. On connaît bien aujourd'hui les principaux mécanismes de corrosion et leur cinétique ainsi que ceux qui régissent la fatigue mécanique, mais on est loin d'avoir vraiment compris ceux qui résultent de la combinaison de la corrosion et des sollicitations mécaniques : on peut soupçonner la nature des synergies possibles entre ces sollicitations quand elles sont couplées en évoquant seulement la possibilité d'une fissuration répétée, sous l'effet d'efforts mécaniques cycliques, des couches de passivation qui naissent en réaction à la corrosion et celle de fournir ainsi régulièrement à l'action de la corrosion de nouvelles surfaces particulièrement réactives. Il est clair que la maîtrise de ces processus demande, plus encore que pour d'autres aspects du vieillissement des matériaux, une approche très fortement interdisciplinaire, encore en gestation.

Toute industrie doit se préoccuper de la durabilité des systèmes qu'elle produit : transports, énergie, conditionnement, information, communication... Il y va à la fois de la qualité des services rendus par ces systèmes et de la sécurité de leur utilisation. Les connaissances techniques d'aujourd'hui permettent de garantir leur bonne mise en service et leur bon fonctionnement initial. Il en va autrement de la garantie de leur utilisation prolongée : les incertitudes qui s'y attachent relèvent d'abord d'une maîtrise insuffisante du vieillissement des matériaux impliqués et de leurs assemblages dans les conditions effectives, parfois difficilement prévisibles, de leur utilisation. C'est pourquoi ce domaine est l'un des plus cruciaux de la science moderne des matériaux et des structures : de la conscience que les scientifiques en auront dépendront largement les progrès de demain dans tous les domaines de l'activité humaine.

Imaginons un instant, sans même évoquer des durées géologiques, que tout phénomène de vieillissement des matériaux ait été bloqué depuis la préhistoire ! À quoi ressemblerait le monde d'aujourd'hui ? Quelle chance de retrouver intacts les trésors du passé ! Quelle horreur que de devoir vivre au milieu d'un amoncellement continûment croissant d'"objets inanimés" ! Naissance, vieillissement et mort des matériaux et des structures : oui, certainement et, par bien des côtés, heureusement ! Une âme, pour autant ? Non, tout de même !

Encore que... ■

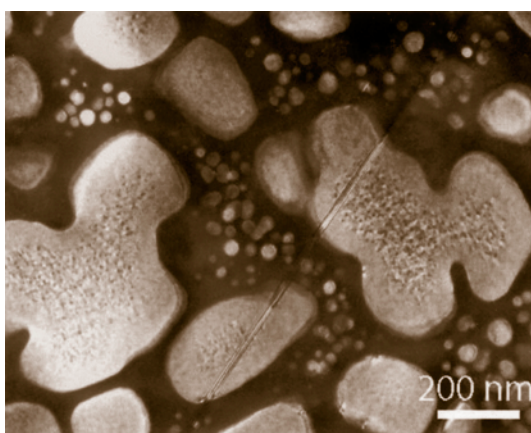


Figure 1 : Microstructure de l'échantillon standard

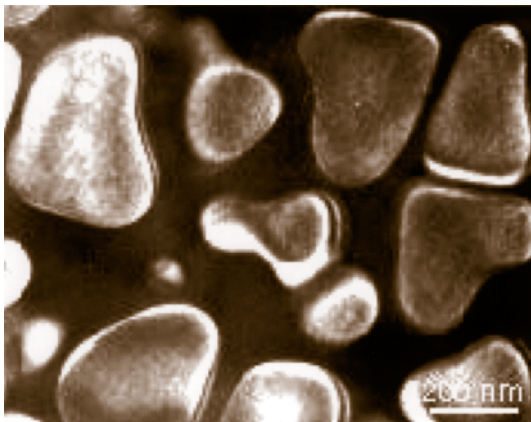


Figure 2 : Microstructure de l'échantillon survieilli

Le vieillissement n'agit pas toujours dans le sens de la fragilisation des matériaux : il peut aussi les rendre plus déformables, ce qui n'est pas forcément bénéfique ! Les figures ci-dessus montrent, dans deux états différents, la microstructure, vue en microscopie électronique en transmission, d'un superalliage à base de nickel (alliage NR3 élaboré par SNECMA pour disques de turboréacteur, apprécié pour sa résistance à chaud). À gauche, le matériau a subi un traitement thermique standard : on remarque non seulement les "gros" précipités (taille = 300 nm), dits secondaires, de la phase durcissante γ' mais aussi de petits précipités γ' tertiaires (taille = 20 nm). À droite, le matériau a subi un traitement thermique supplémentaire, dit de "survieillessement" (revenu à 800 °C pendant 500 heures et refroidissement à l'air), qui a provoqué la disparition, par dissolution, des précipités γ' tertiaires (observations de Sonia Raujol, Florence Pettinari-Sturmel, Armand Coujou et Nicole Clément, CEMES - CNRS, Toulouse). L'effet de ce survieillessement sur les propriétés mécaniques de l'alliage est spectaculaire : la disparition des petits précipités facilite désormais la propagation des dislocations dans les couloirs déformables de la phase γ (en sombre) et augmente de ce fait considérablement la vitesse de déformation sous charge constante (essais de fluage conduits par Pierre Caron et Didier Locq, ONERA, Chatillon). Cette étude est motivée par la recherche d'alliages ayant des durées de vie encore plus longues, sous des températures encore plus élevées, que ceux des actuels turboréacteurs pour vols subsoniques, dans l'optique d'un avion supersonique de deuxième génération, éventuel successeur de Concorde (RRIT "Recherche Aéronautique sur le Supersonique").

soient à son service, sous sa dépendance, mettant ainsi en balance le concept de convivialité avec celui d'autonomie.

La recherche de la convivialité entre un homme et une machine se traduit matériellement par la présence d'interfaces (IHM) censées gérer au mieux les relations et les interactions entre les deux entités. Les théories ou les modèles d'IHM restent pauvres sur le fond parce que s'appuyant sur une connaissance approfondie des systèmes physiologiques, sensoriels et psychiques de l'homme. Elles doivent, par ailleurs,

Le domaine de l'interaction homme-machine est donc immense. Dans la conférence-débat organisée par l'Académie des sciences et l'Académie des technologies le 3 décembre 2001, on s'est limité à essayer de faire le point sur trois questions :

1. Pouvons-nous parler à ou communiquer avec une machine en utilisant notre langage humain, ce langage articulé, source de la pensée humaine qui nous a différenciés de toutes les autres créatures vivantes ? La machine peut-elle comprendre le sens de notre message ?

Gérard Sabah du CNRS-LIMSI, à propos

Sabah a évoqué des opérations de recherche en cours dans son laboratoire visant à doter les machines de processus d'interprétation et de génération d'images et de gestes.

On peut conclure, aujourd'hui, si on accepte certaines limites dans le champ du vocabulaire, de la syntaxe et de la sémantique, qu'il est possible de parler à des machines, et que celles-ci existent déjà pour des services particuliers. Mais des recherches complémentaires sont nécessaires. Quelle que soit sa langue, chaque être humain a son langage personnel lié à son expérience, son éducation, son environnement. L'homme

L'Interaction homme-machine

Par **Erich Spitz**¹ et **Philippe Coiffet**²

Les paléontologues nous ont appris que l'homme se distinguait des autres êtres vivants par sa faculté de créer des outils afin d'agir sur son environnement. Dans le millénaire précédent, ces outils sont devenus des machines dont la complexité s'est tellement accrue au siècle dernier qu'on peut penser qu'elles sont en passe de devenir autonomes dans leurs actions. Comme dans tout progrès scientifique et technologique, cette potentialité est à double tranchant : d'un côté, l'espoir de simplifier la vie de l'homme, de l'autre, la peur d'une prise de pouvoir par les machines ou par ceux qui sauraient encore les maîtriser.

Deux éléments viennent cependant contrarier une vision du futur asservi au règne des machines. Le premier réside dans la difficulté scientifique sinon dans l'impossibilité d'atteindre un niveau d'autonomie comparable à celui d'un être humain. Le second a trait à la volonté de l'homme de créer des machines qui

dépendent des propriétés d'autonomie que peut posséder la machine. Aussi bien, l'existence d'IHM repose aujourd'hui presque uniquement sur la maîtrise de technologies. Les applications des IHM sont cependant, extrêmement nombreuses : conduite de voitures, pilotage d'engins, simulateurs, conduite de robots, d'usines, téléchirurgie, systèmes de réalité virtuelle, etc...

On notera le glissement des domaines de recherche sur ces sujets. Traditionnellement, la conception de machines faisant appel aux mécaniciens, électrotechniciens, automaticiens, informaticiens. Les progrès fulgurants dans ces domaines (circuits électroniques, la miniaturisation de composants, les nanotechnologies) permettaient de prévoir des performances quasi illimitées. Mais pour la conception de machines conviviales, il faut aujourd'hui y rajouter des spécialistes en biologie, neurobiologie, psychologie, neurosciences cognitives etc...

de cette question, a examiné les aspects spécifiques posés par le traitement automatique des langues et le dialogue homme-machine, en insistant sur le fait qu'ils font intervenir des aspects de l'intelligence artificielle et des systèmes collectifs, mais aussi des aspects linguistiques, psychologiques et neurobiologiques. Il a présenté son approche pour résoudre les différents problèmes en l'illustrant par des expériences concrètes montrant les capacités de son système à s'ancrer dans les perceptions et à construire de nouveaux concepts tout en acquérant des capacités langagières syntaxiques et lexicales. Des moyens non langagiers sont également nécessaires pour développer le naturel des communications homme-machine. Gérard

a la faculté de saisir le non-dit, au moins partiellement, dans l'expression orale et gestuelle d'un autre homme. Les machines ne le peuvent pas et ne le pourront peut-être pas de sitôt, même si on compte sur les techniques d'apprentissage pour progresser. Par ailleurs, dans l'application à la traduction entre langues étrangères ce que recouvre la pensée d'un homme qui s'exprime dans sa langue maternelle peut présenter de grandes difficultés à être exprimé correctement avec les mots d'une autre langue.

2. La machine peut-elle prolonger l'action de l'homme à distance ?

Ce sujet a été commenté par Philippe Coiffet de l'Académie des technologies. Il correspond à la problématique de la téléopération ou travail à distance avec une machine collaborant avec son opérateur humain.

L'efficacité d'un système de téléopération dépend alors de la manière dont on peut mettre en œuvre les deux fonctionnalités suivantes :

¹ Correspondant de l'Académie des sciences et Membre de l'Académie des technologies
² Membre de l'Académie des technologies

- annuler artificiellement la distance entre l'homme et la machine afin que le premier soit "près de la machine", "dans le monde de la machine". C'est le problème de la présence ou de la téléprésence,
- doter la machine d'un niveau suffisant d'autonomie de comportement afin qu'elle soit un partenaire ou un assistant efficace.

On peut classer les difficultés en quatre classes principales :

- l'ergonomie de la commande manuelle;
- la qualité des retours informatifs depuis la machine vers l'opérateur humain;
- le choix du niveau d'autonomie dont on peut doter la machine et celui de la stratégie de collaboration;
- la résolution des problèmes de délais de transmission des commandes/contrôles entre l'homme et la machine.

Les pistes pour proposer des solutions sont variées et facilitées aujourd'hui par les techniques de réalité virtuelle et d'intelligence artificielle. Pour réaliser des progrès, il faudra surtout :

- mieux identifier et comprendre le fonctionnement du système sensoriel humain dans son ensemble;
- mieux comprendre la comportement humain lors de l'exécution d'une tâche.

Les progrès des dernières années en commande téléopérée ont été rapides. On peut penser obtenir des systèmes de télétravail ou de télécommande de robots suffisamment conviviaux et efficaces pour générer une demande massive d'ici quelques lustres. Les

conséquences socio-économiques pourraient être importantes.

3. La connaissance du fonctionnement de l'homme, de la machine humaine, si complexe et si subtile peut-elle nous apprendre à construire des machines mieux adaptées à leur utilisation ?

Cette question a été explicitée par Alain Berthoz de l'Académie des sciences, en s'appuyant sur un exemple : l'intégration multisensorielle dans la perception de l'espace et la mémoire des déplacements.

Au cours de l'évolution, les organismes vivants ont en effet découvert et utilisé des simplifications remarquables de la neurocomputation.

Par exemple :

- la décomposition par le cerveau des informations données par les capteurs de mouvements en variables (rotations, translations, direction), semblables à celles de la géométrie euclidienne;
- la mesure de la distance, à partir de variables directement fournies par la détection visuelle, du "temps jusqu'au contact" sans qu'il soit besoin de faire un "calcul" géométrique;
- l'utilisation, pour la perception visuelle, de propriétés (symétrie, rigidité, stationnarité...) qui facilitent l'extraction d'invariants dans la complexité du flux optique;
- l'existence de lois simples liant la production, la courbure et la vitesse tangentielle dans la production d'une trajectoire motrice. Cette loi contraint aussi la perception du mouvement visuel et la perception du "mouvement

biologique", suggérant que les mêmes règles gouvernent la perception et la production des actions ;

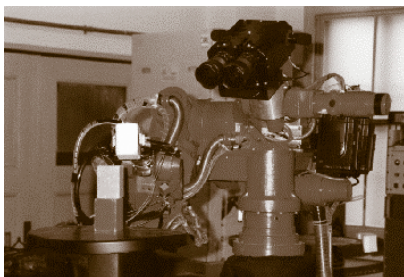
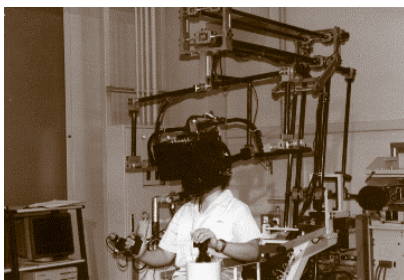
- l'utilisation de référentiels variés (égo-centrés, allo-centrés) et d'un répertoire de stratégies cognitives (utilisées de façon différentes, par exemple, par les hommes et par les femmes) pour résoudre un même problème de représentation mentale de l'espace ou de mémoire des trajets. Ces processus peuvent être étudiés grâce aux méthodes de la psychologie expérimentale, l'enregistrement de neurones chez l'animal en activité, l'imagerie cérébrale, la neuropsychologie et la modélisation des processus.

Enfin, Alain Berthoz a évoqué la possibilité d'utiliser les technologies de réalité virtuelle pour l'élaboration, par exemple, de simulateurs, mais aussi de nouvelles thérapies cognitives dans des affections liées à l'âge, ou même psychiatriques, dues à la désorientation spatiale.

En conclusion, les nombreuses questions posées aux intervenants ont montré l'attraction qu'exerce le concept de machine intelligente en même temps que l'inquiétude générée par l'idée que la machine pourrait échapper à l'homme et s'imposer comme son égal ou son maître. Cette crainte est celle de l'inconnu. En fait, il y a probablement dans le public une confusion entre deux catégories de machines :

- celles qui ne font que mettre en œuvre des automatismes programmés par l'homme, un peu à l'image des animaux inférieurs et qui n'ont rien à voir avec l'intelligence humaine. Ces machines peuvent être très complexes dans leur comportement ; on peut les programmer pour qu'on ne puisse pas arrêter l'exécution de leur mission. Elles peuvent donc s'avérer extrêmement dangereuses et on sait très bien les fabriquer aujourd'hui. De celles-là on peut avoir peur,
- celles où l'on tente d'implanter certaines formes d'intelligence humaine, permettant en particulier des échanges "naturels" avec des êtres humains. C'est bien ces machines qu'il faut développer et qui diminuent, en principe, le risque associé aux précédentes. Mais un homme libre est-il lui-même plus rassurant qu'une machine programmée ?

Quant à savoir si finalement les propriétés des secondes qu'on ne maîtrise pas encore bien pourraient être transférées aux premières en augmentant leur danger potentiel, c'est une question qui reste posée ■



Système de téléexistence (Université de Tokyo). En bas, le poste de commande; en haut : le robot anthropomorphique. Grâce aux techniques de réalité virtuelle, l'opérateur se trouve subjectivement à la place du robot.



Système de téléopération pour des applications nucléaires. L'opérateur, en activant le bras maître à retours d'efforts et en utilisant des lunettes redonnant le relief, manœuvre au sein du monde virtuel, copie du monde réel, comme s'il était présent.



Les phénomènes aux interfaces et les Géosciences

Par Jean Maurice Cases¹

Une séance s'est tenue le lundi 10 décembre, dans la salle de l'Académie des sciences, sous la présidence de MM Hubert Curien et Jean Dercourt assistés de M. Georges Pédro. Elle a été consacrée aux connaissances nécessaires à une meilleure compréhension des phénomènes aux interfaces et à leurs applications dans le domaine des Géosciences.

L'importance du sujet traité peut être illustré par quelques exemples. La physicochimie des interfaces porte sur la caractérisation, l'analyse, la modélisation des phénomènes qui se manifestent aux limites entre phases. De ce fait, son champ scientifique englobe non seulement les conditions de genèse des phases minérales, leur équilibre avec leur milieu ambiant et les mécanismes d'altération mais aussi la connaissance du rôle de l'eau dans les sols et l'ensemble des phénomènes où interviennent des interactions eau-roches. Il s'agit d'acquérir de nouvelles connaissances nécessaires à une meilleure gestion et une meilleure protection du patrimoine "eau continentale", d'optimiser de nombreuses opérations de génie civil dont les prévisions concernant la stabilité des terrains et la mise au point de nouveaux géomatériaux, de permettre l'exploitation d'importantes réserves de pétrole qui seront abandonnées si de nouvelles méthodes de récupération assistée, à un coût acceptable, ne sont pas mises rapidement au point, d'améliorer sans

cesse la sélectivité des opérations de concentration des minerais par flottation (70 % des besoins). Enfin, l'utilisation croissante des minéraux industriels dans les matériaux composites ou polyphasés en tant que charges renforçantes, diluants ou pigments minéraux subira une véritable révolution le jour où seront mieux compris les interactions des minéraux avec leur milieu d'utilisation.

Dans ce domaine des Géosciences, l'étude des propriétés de surface des minéraux naturels et des solides mal cristallisés présente donc des interactions fortes avec les sciences voisines mais aussi des applications importantes dans l'industrie et les sciences de l'environnement.

Les présentations ont plus particulièrement porté sur les mécanismes de rétention des adsorbats par les solides en solution aqueuse. Une bonne approche scientifique de ces phénomènes impose la prise en compte :

- des propriétés structurales et cristallographiques des roches et des minéraux qui la composent. La caractérisation de l'hétérogénéité des milieux naturels, l'influence des impuretés sur la forme des particules élémentaires et tout particulièrement des argiles, la connaissance et la nature des minéraux amorphes constituent la première étape incontournable des recherches,
- des propriétés texturales du solide avant immersion dans l'eau. Il s'agit, non seulement de mesurer la surface spécifique des minéraux mais surtout de déterminer leur hétérogénéité énergétique superficielle. Les méthodes récentes de volumétrie d'adsorption de gaz basse pression en quasi équilibre permettent après modélisation de caractériser la courbe de distribution énergétique des sites superficiels et ainsi par exemple, la mesure du facteur de forme des minéraux phylliteux, c'est à dire la connaissance des faces basales et latérales, la détection des sites d'adsorption de forte énergie, l'étude plus fine de la porosité des minéraux et des roches. Un très bel exemple d'application concerne la mise au point de certains charbons actifs susceptibles de retenir des contaminants spécifiques,

- des propriétés superficielles des solides hydrophiles après immersion dans l'eau. Les auteurs ont rappelé l'importance de la couche d'eau structurée (2 à 3 couches d'eau en moyenne). Elle est solidaire du solide et empêche toute mesure directe des chaleurs nettes d'adsorption. Elle est déplacée par l'adsorption des tensio-actifs ou des polymères. Elle protège certains solides d'un broyage fin ce qui nécessite l'utilisation de "réactifs destructurants" de l'eau. Le mécanisme d'acquisition par les solides immergés d'une charge superficielle, fonction dans de nombreux cas du pH (hydrolyse de sites amphotères), et responsable de l'adsorption des espèces ioniques ou neutres (cas des alcools au point de charge nulle) a été discuté ainsi que les différents modèles utilisés. L'accent a surtout été mis sur la mise au point récente d'une méthode de titration potentiométrique haute résolution permettant la caractérisation des distributions d'affinités protoniques et les valeurs de pK des différents types de sites.

Ces connaissances permettent de préciser les mécanismes de rétention des adsorbats. Le choix s'est porté sur les tensioactifs, réactifs susceptibles de se fixer sur la surface par l'intermédiaire de liaisons normales fortes de nature électrostatique ou chimique (cas des tensioactifs ioniques) ou de liaisons faibles de type liaison hydrogène (cas des tensioactifs non ioniques). Les liaisons fortes entre les chaînes aliphatiques sont à l'origine de la formation d'agrégats superficiels de nature très variée : micelles sphériques si les liaisons normales sont faibles (la surface reste toujours hydrophile quelque soit le taux de recouvrement), agrégats lamellaires à une couche si les liaisons normales sont fortes. Dans ce cas le remplissage de la surface se fait progressivement par condensation bidimensionnelle des molécules sur les différents domaines homogènes de la surface. Les domaines les plus énergétiques étant remplis

les premiers. La surface devient de plus en plus hydrophobe. De cette dernière observation, on déduira que les tensioactifs ioniques sont d'excellents traceurs de l'hétérogénéité superficielle des minéraux. Ces résultats ont pu être obtenus par l'utilisation de méthodes aussi diverses que la microcalorimétrie d'adsorption, l'ellipsométrie, la spectroscopie de déclin de fluorescence, la diffusion des neutrons, la microscopie à force atomique, la spectrométrie infrarouge couplée à la réflexion externe qui viennent compléter l'analyse conventionnelle des isothermes d'adsorption. Si le tensioactif ionique est susceptible de précipiter (cas des acides gras en présence d'ions calcium), l'utilisation de la réflexion externe montre que la surface se recouvre très rapidement de multicouches (20 dans le cas de la fluorine). Ces couches ne sont pas stables. La phase adsorbée se désorbe en quelques minutes pour atteindre des valeurs de taux de recouvrement de la surface de l'ordre de la monocouche ou moins. Ce phénomène étant proche de ceux décrits par Ostwald.

Pour conclure, les exposés ont permis de montrer que la compréhension des mécanismes d'adsorption ou de rétention dans les milieux naturels passent d'une part par la connaissance de l'hétérogénéité de la roche et des propriétés superficielles des minéraux qui la constituent et d'autre part par une connaissance la plus approfondie possible de la physico-chimie des adsorbants en solution aqueuse. Les mêmes remarques s'appliquent à la dynamique et à la réactivité des assemblages organo-minéraux présents dans nos rivières ■



¹ Directeur de recherche émérite du CNRS

Relations avec l'Académie des sciences du Sénégal

Par Yves Quéré¹

Parmi les actions lancées récemment par l'InterAcademy Panel (IAP), celle de l'aide au développement des jeunes académies est sans doute l'une des plus concrètes. Elle consiste à proposer aux jeunes académies des sciences, notamment à celles du continent africain, des stages destinés aux personnels de gouvernance de ces académies, leur permettant d'effectuer des visites approfondies dans des académies plus anciennes.

C'est dans ce cadre que notre Académie a reçu récemment, avec le soutien financier de la Fondation Bettencourt Schueller, la visite de trois représentants de l'Académie des sciences du Sénégal: MM. I. Diop Mar, Secrétaire perpétuel, O. Dia, Membre du Bureau, et O. Fall, Directeur de cabinet du Président. MM. Dia et Fall, qui ayant séjourné respectivement deux et quatre semaines, ont pu ainsi passer un temps raisonnable dans chacun des services de l'académie, les regarder fonctionner, poser des questions et proposer des commentaires. L'expérience a semblé suffisamment positive à nos amis sénégalais pour que d'autres académies d'Afrique (francophone et anglophone) aient manifesté le souhait de nous rendre des visites de même nature.

Des expériences analogues sont prévues avec pour cadres l'Académie de Suède, la TWAS (Third World Academy on Sciences) et la NAS (National Academy of Sciences des États-Unis) ■

L'enseignement en Bolivie

Par Yves Quéré

A la suite d'un accord avec l'Académie bolivienne des sciences, notre Académie a décidé de contribuer à l'enseignement d'une Maestria (maîtrise) de physiologie, à La Paz.

Jusqu'à présent, l'absence d'un tel enseignement en Bolivie imposait aux jeunes Boliviens désireux de faire une thèse, de se rendre à l'étranger. Il nous a donc semblé utile de proposer à l'Académie bolivienne et à l'Institut Bolivien de Biologie de l'Altitude (IBBA), laboratoire soutenu par la France, de collaborer à cet enseignement par l'envoi de deux chercheurs français qui assureraient chacun deux semaines de cours intensifs en espagnol. L'Ambassade de France en Bolivie et l'Académie des sciences ont pu prendre en charge les séjours et les voyages de ces deux chercheurs.

Il s'agit de Madame Mayaux, épidémiologiste à l'INSERM, du laboratoire de recherche en santé publique, à Bicêtre et de Monsieur Pont-Lezica, du laboratoire CNRS/Université Paul Sabatier de Toulouse "signaux et messages cellulaires chez les végétaux".

Ces deux chercheurs ont apprécié l'organisation des cours, et l'intérêt porté par les étudiants à leur enseignement. Ils ont aussi été favorablement impressionnés par la qualité des recherches menées à l'IBBA.

Ces résultats positifs nous encouragent à renouveler cette collaboration l'an prochain ■

La Grande médaille d'or 2001 de l'Académie des sciences

La grande médaille d'or 2001 de l'Académie des sciences a été décernée à Albert Eschenmoser, né en 1925. De nationalité suisse, Albert Eschenmoser a fait toutes ses études et sa carrière à l'école polytechnique fédérale de Zurich. Après y avoir pris sa retraite, il s'y est inscrit comme post-doc, suivant en cela l'exemple de son éminent collègue, notre regretté confrère Vladimir Prelog. Il partage actuellement ses activités entre l'EPZ et la Scripps Institution de la Jolla, où il a monté une équipe de recherche active. Albert Eschenmoser est un géant de la chimie organique moderne. Outre une énorme production de nouvelles réactions, de nouvelles structures, de thésards formés aux disciplines les plus strictes, il a son actif trois réalisations majeures, qui marquent de façon décisive la seconde moitié du siècle passé. Par la règle isoprénique biogénétique, à l'établissement de laquelle il a puissamment contribué il y a près de cinquante ans, il a donné la clé expliquant le mécanisme de formation des dérivés terpéniques, constituants universels des êtres vivants. Tout le monde connaît le cholestérol ou l'odeur de la rose, la couleur blanche de l'écorce de bouleau ou celle, rouge, de la tomate, les vitamines A ou D, les hormones stéroïdes etc. Dans les années 80, Albert Eschenmoser a participé à une entreprise folle: la synthèse de la vitamine B12, la structure organique la plus complexe connue: elle combine un squelette qui ressemble à celui de la chlorophylle ou de l'hémoglobine, mais en beaucoup plus compliqué, avec un atome de cobalt, un sucre, une



Albert Eschenmoser

base nucléique, des subtilités stéréochimiques... L'établissement de sa structure par radiocristallographie avait été un tour de force justifiant le Prix Nobel attribué à Madame Dorothy Crowfoot-Hodgkin. Par la synthèse totale de la vitamine B12, réalisée, par une collaboration transatlantique exemplaire avec Robert Woodward, il a montré que la synthèse d'aucune molécule naturelle, quelle que soit sa complexité, n'était désormais hors de portée des chimistes organiciens. Depuis les années 90, par la synthèse d'analogues des acides nucléiques comprenant d'autres sucres que le ribose, par exemple du glucose, il a montré comment pourrait éventuellement être fondée une "autre vie", sur une autre planète. Au début d'un siècle qui voit devenir opérationnelles des disciplines comme l'exobiologie, c'est une contribution des plus importantes. Albert Eschenmoser est unanimement reconnu comme l'une des figures les plus marquantes de la Chimie organique moderne ■

Élections d'Associés étrangers

L'Académie des sciences procède actuellement (1^{er} semestre 2002) à l'élection de 24 associés étrangers, scientifiques mondialement reconnus. Les informations relatives à ces élections ne pourront donc être diffusées que dans le numéro de l'été 2002 ■

Carnet

Guy Blaudin de Thé, Correspondant de l'Académie des sciences, dans la section "Biologie humaine et sciences médicales", a été élu, le 1^{er} octobre 2001, Membre associé étranger de l'Institut de médecine de l'Académie des sciences des États-Unis. Il partage cet honneur avec deux britanniques, le Professeur Rudolph Klein, de l'Institut supérieur d'économie de Londres et le Professeur John Newsom-Davis, du Département de neurologie clinique de l'Université d'Oxford ■



la lettre n. 3 / printemps 2002 de l'Académie des Sciences

Publication de l'Académie des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS
Tel: 01-44-41-43-68
Fax: 01-44-41-43-84
http: www.academie-sciences.fr

Directeur de publication:
Nicole Le Douarin

Directoire:
Nicole Le Douarin
Jean Dercourt

Rédacteur en chef:
Jean-Didier Vincent

Secrétariat général de rédaction:
Marie-Christine Brissot

Conception graphique
Direction artistique
Nicolas Guilbert

Photographies:
p. 1, *L'Hiver*: Pierre 1^{er} Legros, Musée du Louvre (DR) photo N.G.,
p. 13, *Monsieur Jaz*: N. Guilbert, col. privée,
pp. 5, 6, 8, 19, N. Guilbert,
pp. 2, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 16, 18, 19, 20 (DR).

Comité de rédaction:
Jean-François Bach, Roger Balian, Jack Blachère, Édouard Brézin, Pierre Buser, Paul Caro, Jules Hoffmann, Alain Pompidou, Pierre Potier, Éric Spitz, Jean-Christophe Yoccoz

Photogravure & impression:
Edipro/Printreference™
01 41 40 49 00

¹ Membre de l'Académie des sciences