

BULLETIN N° 89
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du Mardi 9 novembre 2004

Conférence de notre collègue
ALAIN STAHL

« Science et Philosophie »

Prochaine séance : le Mardi 14 Décembre 2004 :

Conférence du Professeur
José-Alain SAHEL

« Rétinopathies pigmentaires »

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Gilbert BELAUBRE
SECRETARE GENERAL : Michel GONDRAN
SECRETARE GENERAL ADJOINT : Irène HERPE-LITWIN
TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL.
CONSEILERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI.
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. François BEGON
PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen RENE DARS.

PREDIDENT FONDATEUR
 DOCTEUR Lucien LEVY (†)
SECRETARE GENERAL D'HONNEUR
 Pr. P. LIACOPOULOS
TRESORIER GENERAL D'HONNEUR
 Pr. H. NARGEOLET

Novembre 2004

N° 89

TABLE DES MATIERES

- P. 5. Compte-rendu de la séance du 9 novembre 2004.
- P. 9. Comptes- rendus de la section Nice Côte d'azur.
- P. 17. Documents sur les maladies de la rétine, Cerveau et Conscience, et les Fractales à l'occasion de l'hommage rendu à B. Mandelbrot.

date de la prochaine séance :

Le Mardi 14 Décembre 2004 à **18h.**, salle 215, M.S.H.

**Conférence par le Professeur
José Alain SAHEL**

**« Rétinopathies pigmentaires : de la
thérapie cellulaire à la signalisation
intercellulaire »**

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 9 Novembre 2004

Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.

La séance est ouverte à 18 heures.

Sont excusés:

- nos collègues François Bégon Bruno BLONDEL, Françoise DUTHEIL, Gérard LEVY, Emmanuel NUNEZ.

Figurent à l'Ordre du jour de cette réunion :

- Un rapport sur la préparation du congrès internationale : « Fractales en Progrès »
- Une conférence de notre collègue Alain STAHL sur son livre : « SCIENCE ET PHILOSOPHIE »

I . Congrès « Fractales en Progrès »

En l'absence de notre collègue François BEGON, Gilbert BELAUBRE donne quelques indications sur le congrès qui doit se tenir les 12 et 13 Novembre prochains.

L'amphithéâtre retenu est l'amphithéâtre n°2. Un certain nombre d'invitations ont été adressées par l'intermédiaire du magazine électronique @RT flash . Des professeurs de l'enseignement supérieur ainsi que des professeurs de classes préparatoires ont également fait l'objet d'invitations.

L'ensemble des résumés ayant été collecté, un fascicule a été édité qui comporte le programme et l'ensemble des résumés.

Les membres de l'Académie ont reçu une lettre d'invitation gratuite pour le congrès. Gilbert BELAUBRE, à ce propos, vous prie de l'excuser de vous avoir envoyé par inadvertance un brouillon de la lettre d'invitation à la place de la lettre en bonne forme.

II . Conférence d'Alain STAHL sur son livre « SCIENCE ET PHILOSOPHIE »

Alain STAHL, ancien élève de l'Ecole Polytechnique, major de sortie de sa promotion , a fait dans le corps des Mines une carrière de responsabilités ministérielles dans l'industrie chimique française. Il a décidé, lors de son passage à la retraite, de se consacrer à une thèse à visée épistémologique et de réaliser ainsi une de ses aspirations les plus profondes : essayer de trouver « l' Unité de la Science ».

Sa thèse, effectuée sous la direction du Pr Jean LARGEAULT qui avait pour titre « *Philosophie de la Science Contemporaine* », aurait reçu un accueil plus attentif des scientifiques que des philosophes.

Alain STAHL nous a exposé sa méthode, son champ de recherches.

Son domaine d'exploration s'étend des mathématiques jusqu'aux sciences cognitives en passant par les sciences physico-chimiques, la biologie. Il ne comprend pas celui des sciences humaines, hormis une incursion rapide dans la linguistique. Cependant, il veut éviter toute position réductionniste, telle que, par exemple, réduire la biologie à de la simple chimie.

Il étudie les critères permettant de juger de la valeur des diverses théories , leurs aspects dialectiques tels que la relation subtile entre probabilités et déterminisme, hasard et liberté. Il pose les questions du Vrai, du Réel, de la Liberté.

Ses conclusions suggèrent que l'épistémologie est une discipline sinistrée. Il regrette la trop grande emprise du positivisme logique et de la philosophie analytique qui ne s'intéresse qu'à des subtilités étroites. Il regrette que si peu d'auteurs (dont le dernier semble avoir été Karl POPPER) s'intéressent à la philosophie globale des Sciences.

Diverses questions font suite à cet exposé portant sur :

- la Théorie de l'Evolution
- la nécessité de trouver un lien entre théorie abstraite et monde réel
- la soi-disant liberté des particules
- déterminisme et matérialisme
- l'apport des théories logico-mathématiques modernes en philosophie des sciences
- l'apport de la philosophie francophone (Bachelard, Cavailles, Gonseth..)
- l'origine de l'univers

Alain Stahl y donne quelques brèves réponses :

- Il s'attache plus particulièrement à définir déterminisme, hasard et possible.
- Il existe un hasard de base reconnu par la majorité des physiciens quantiques .
- Il revient sur la notion de possible - ce qui peut se produire sans se produire sans se produire nécessairement -.
- Il ne pense pas que la liberté et le hasard soient liés.
- Dans le domaine de l'Evolution il introduit la notion de hasard quantique pour expliquer les sauts qualitatifs des mutations. Il est partisan de l'hypothèse d'une origine unique de la vie sur terre.

Sont abordées également :

- les relations entre déterminisme et prédictibilité , déterminisme et finalisme.
- Les présupposés mentaux de la causalité. Selon l'échelle à laquelle on se place on est en présence d'une interprétation probabiliste ou déterministe.
- L'éventuelle présence d'un principe finaliste pour expliquer la survenue d'un phénomène aussi improbable que la vie.
- Le caractère prédictible et reproductible des lois scientifiques
- La relation entre les théories logico-mathématiques et les sciences humaines
- La relation entre le Vrai et le Réel

Après ce très riche exposé, la séance est levée à 20 heures.

Pour ceux qui souhaitent en savoir plus :

Le Livre de notre Collègue Alain STAHL :

SCIENCE ET PHILOSOPHIE

est disponible dès maintenant

aux éditions VRIN

6, place de la Sorbonne 75005 Paris

Bien amicalement à vous, Gilbert BELAUBRE, Michel GONDRAN, Irène HERPELITWIN

Comptes - rendus de la Section Nice-Côte d'Azur

*Le savoir est le seul bien qui s'accroisse à le partager. Comprendre est bien sans limite qui apporte une joie parfaite.
Baruch SPINOZA (1632-1677)*

Séance du 16 Septembre 2004 (74^{ème} séance)

Présents :

Alain Bernard, René Blanchet, Sonia Chakhoff, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Thierry Gontier, Jean-Paul Goux, Jean-François Mattéi, Maurice Papo

Excusés :

Jean Aubouin, Pierre Coulet, Emile Girard, Jean Jaubert, Daniel Nahon, Alexandre Sosno, Jacques Wolgensinger.

1- Approbation du compte-rendu de la 73^{ème} séance.

Le compte-rendu est approuvé sans modification à l'unanimité des présents.

2- Actes du colloque : « Science et jeunesse ».

Ce colloque tenu le 2 avril 2004 au CUM est sorti des presses et sera prochainement disponible en librairie (10 €).

3- Actes du colloque : « La science en mouvement ».

Sont encore en préparation.

4- Le mois écoulé.

A l'initiative de notre confrère Pierre Couillet, notre Académie a participé à la mise en place de trois projets majeurs pour notre département :

I- L'Université d'Eté qui se tient actuellement à St Etienne de Tinée, réunit des chercheurs de très haut niveau dans une ambiance calme et familiale. C'est la première manifestation d'un projet basé sur le modèle de celui d'Aspen où les chercheurs prennent le temps de discussions détendues, à l'inverse des colloques internationaux (comme aux Houches) où les programmes sont très chargés. Il vise à associer la formation des jeunes chercheurs et la recherche de haut niveau. Il est suggéré que le Maire de St Etienne de Tinée propose un jumelage avec la ville d'Aspen aux USA. Notre confrère Jean-Paul Goux est chargé de lui transmettre cette idée. Il faudra aussi le soutien financier du Conseil Général.

II- L'Institut Robert Hooke, du nom de l'ancien secrétaire de la *Royal Society* de Londres du temps de Newton. R Hooke avait le génie du bricolage et de l'expérimentation. Ses travaux ont permis à ses confrères de comprendre les phénomènes physiques grâce à des démonstrations simples. Cet institut a pour but de mettre au point, avec les professeurs d'université et ceux du secondaire, des démonstrations s'adressant aux lycéens. Il sera mis en place avec le soutien de M. Marouani, Président de l'Université de Nice.

III- Le Couvent de la Visitation et la Maison de la Science. Ce couvent classé et actuellement inoccupé, qui est situé au centre de Nice, appartient à la Ville qui ne semble pas avoir, actuellement, les moyens de le remettre en état. Ces moyens pourraient être réunis par le Conseil Général et par ICRANET via la Communauté Européenne. ICRANET est un organisme international, présidé par le Professeur Ruffini (natif de La Brigue). Il a pour but de réunir des jeunes chercheurs surdiplômés et des enseignants de très haut niveau pour des stages de longue durée destinés à définir les méthodes pour analyser les données très nombreuses et disparates recueillies ces dernières années par les astrophysiciens du monde entier sur la relativité et les trous noirs.

Parallèlement, le but d'une **Maison de la Science** a été progressivement défini par les deux colloques que nous avons tenus cette année (*Science et jeunesse – La science en mouvement*). Elle vise à réconcilier les jeunes avec la science universitaire : une science vivante, active, simple.

Elle vise aussi à accueillir des professeurs du secondaire et même les publics autour de la science dans un dispositif souple et ouvert. D'où l'idée de commencer par une association dont les statuts viennent d'être déposés le 2 août 2004 à la Préfecture de Nice par notre confrère René Blanchet, Président. Ils comportent un conseil d'administration impliquant les collectivités territoriales, les membres fondateurs et un conseil scientifique composé de très hautes personnalités nationales et, si possible, européennes.

Il lui fallait un lieu central, Nice Ville. D'où l'idée, compte tenu de la grande surface disponible (8000 m²) du Couvent de la Visitation, de nous agréger au projet ICRANET dont la réalisation ferait de Nice un pôle scientifique international.

Les réunions du conseil scientifique de la Maison de la Science pourraient être jumelées avec des colloques que nous organiserions.

Le nouveau Président de l'Université de Nice M. Marouani a, dès le départ, été très favorable à notre action. Il manifeste un intérêt croissant pour les trois projets.

Le Recteur Jean-Marie Carbasse manifeste le même intérêt pour nos travaux.

5- Cooptation d'un nouveau membre.

L'Académie est favorable à la proposition de cooptation de M. le Professeur Gérard IOOSS.

6- Prochains colloques.

La tenue des deux colloques et les conséquences qui en ont résulté au plan départemental nous ont beaucoup mobilisés.

Il semble qu'il soit maintenant souhaitable de reprendre nos activités scientifiques pluridisciplinaires habituelles en vue de la préparation d'autres colloques en 2005.

Après discussion, nous nous proposons d'examiner les thèmes suivants :

- La Science et les mythes
- Le principe de l'audace
- La gouvernance du monde ; multimédias et modélisation

7- Questions diverses.

Maurice Papo : Il y a quelques années, j'avais fait le projet d'un Institut destiné à remettre à niveau des personnes ayant réussi. Le problème en effet n'est pas seulement de prendre des élèves très intelligents et d'en faire des super diplômés, mais aussi de prendre des anciens élèves qui ont réussi, font des carrières brillantes, mais pas dans la recherche ni dans l'industrie. On leur offrirait une formation destinée à les remettre au niveau des jeunes diplômés actuels.

Il y a eu des volontaires issus des cadres les plus élevés pour profiter de cette opportunité dans la mesure où elle était compatible avec leur emploi du temps.

Je regrette que cela n'ait pas pu se faire car il y a actuellement beaucoup de cadres qui peuvent brusquement être obsolètes à 40 ou 50 ans, qui pourraient tirer bénéfice d'une telle remise à niveau. Ce pourrait être une des activités de la Maison de la Science.

René Blanchet : On pourrait aussi imaginer que cette Maison de la Science puisse réorienter des chercheurs de haut niveau vers autre chose que la carrière d'enseignant-chercheur à l'Université où les débouchés sont actuellement inexistantes. J'ai l'exemple d'un mathématicien titulaire de trois post Doc. qui pourrait par exemple être réorienté vers la Finance.

★★

Prochaine réunion

le jeudi 21 octobre 2004 à 17 heures
au siège
Palais Marie-Christine
20, rue de France
06000 NICE

Séance du 28 Octobre 2004

(75^{ème} séance)

Présents :

René Blanchet, Pierre Coulet, Patrice Crossa-Raynaud, Guy Darcourt, René Dars, Jean-Pierre Delmont, Emile Girard, Gérard Iooss, Maurice Papo, Alexandre Sosno, Jacques Wolgensinger.

Excusés :

Jean Aubouin, Alain Bernard, Sonia Chakhoff, Thierry Gontier, Jean-Paul Goux, Jean Jaubert, Jean-François Mattéi, Daniel Nahon.

8- Approbation du compte-rendu de la 74^{ème} séance.

Le compte-rendu est approuvé sans modification à l'unanimité des présents.

9- Actes du colloque : « Science et jeunesse ».

L'ouvrage est distribué aux présents et sera disponible prochainement en librairie.

10- Proposition de cooptation de deux nouveaux membres.

Plusieurs de nos confrères ont proposé la cooptation de deux nouveaux membres. Leur CV a été adressé à tous nos confrères. En l'absence d'un refus motivé auprès du Président avant la prochaine séance, les deux membres seront considérés comme acceptés et il sera demandé aux parrains de les informer.

11- Le mois écoulé.

Pierre Coulet : Nous avons participé aux journées « La science en fête » en organisant une réunion à Valrose à l'occasion du 400^{ème} anniversaire de la lettre du 16 octobre 1604 de Galilée à Paolo Sarpi. Il conviendra que, l'an prochain, il y ait plus de manifestations de ce genre. Cela pourra être une des initiatives de « La Maison de la Science » qui vient d'être créée.

Dans cet esprit, il conviendrait que l'on organise au printemps prochain une journée en hommage à Henri Poincaré, à l'occasion de l'inauguration du nouvel amphithéâtre de mathématiques qui portera son nom.

René Blanchet : Le Président de l'association de « La Maison de la Science » voudrait mettre en avant pour celle-ci deux caractéristiques : la convivialité et l'émotion.

Avait été mis en avant trois projets : Icranet, Mercantour et la Maison de la Science.

Il est vite apparu que le premier projet important était Icranet parce qu'il était lisible et intéressait tout le monde.

Le projet d'Académie d'été-Mercantour a également pris forme très concrètement avec des scientifiques de haut niveau, acceptant de dialoguer durant leurs moments de détente avec des collégiens. Le Conseil municipal au complet a assisté avec le conseiller général Estrosi à la séance de clôture illustrée notamment par une conférence du Prof. Ruffini.

Pour « La Maison de la Science », on peut très bien fonctionner avec une maison sans murs, l'essentiel étant de définir des programmes qui vont nous différencier et nous faire reconnaître. Il faudra faire bientôt une réunion du conseil scientifique accompagnée d'un colloque.

Les journées de la Science en fête existent depuis une dizaine d'années, mais sont devenues très institutionnelles avec un mode d'emploi défini par une commission nationale.

Il faudrait faire autrement pour redonner du souffle à ces journées où les élèves ne vont plus. Pour les attirer à nouveau, il faut qu'il y ait de l'émotion. Il faudra faire du lycée un pôle local d'animation scientifique comparable à celui que nous connaissons ici, au sein de nos réunions de l'Académie.

Il faut enfin que nous participions à ce mouvement national de création de pôles de compétitivité (DATAR), se définissant comme la combinaison sur un espace géographique donné d'entreprises, de centres de formation et d'unités de recherche engagées dans une démarche partenariale destinée à dégager des synergies autour de projets communs à caractère innovants et disposant de la masse critique nécessaire pour une visibilité internationale.

Pour cela, il faut faire évoluer nos dispositifs trop verticaux pour provoquer davantage d'interactions entre les acteurs. « L'efficacité venant de l'absence de cloisonnement entre les Universités, la Recherche et les Entreprises grâce aux autorités régionales » (Christian Blanc).

Géographiquement, Sophia Antipolis correspond à ces définitions, mais il est souhaité qu'il y ait des pôles de compétitivité au-delà de ce qui existe déjà.

Documents

A . A l'occasion de la conférence du Pr. A.-J. Sahel.

P . 17 : **Rétinopathies pigmentaires**,

Par José-Alain Sahel et Thierry Lévillard

P . 22 : **La vue retrouvée, grâce à des cellules de fœtus** (New Scientist)

P . 23 : **Des cellules souches de la rétine se régénèrent après avoir été transplantées** (Proceedings National academy of Sciences).

B. Cerveau et conscience.

P . 24 : **Conscience et plaisir** ; réflexions autour du thème de la conscience, par notre collègue Antoine Fratini.

Ces réflexions viennent enrichir les sujets traités par Cabanac, Cardon et Singer.

P . 26 : **Demain, l'homme neuronique** . Editorial de René Trégouët N° 309 de @RT flash. Hallucinante perspective des associations cérébrales homme-machine.

C. Retour sur les fractales, hommage à Mandelbrot

P . 28 : **Le monde en 2,7 dimensions** (l'Express). Un « article de journaliste » qui paraît au moment de notre congrès scientifique (et très mathématique).

A. A l'occasion de la conférence du Pr. José-Alain SAHEL

RÉTINOPATHIES PIGMENTAIRES : de la thérapie cellulaire à la signalisation intercellulaire, Progrès pathogéniques et espoirs thérapeutiques, au-delà de l'identification des gènes.

José-Alain SAHEL et Thierry Lèveillard

Les rétinopathies pigmentaires, qui affectent 30 000 à 40 000 personnes en France, figurent au sein d'une large liste d'affections orphelines dont la gravité ne suffit souvent pas à susciter un intérêt notable de la part de l'industrie pharmaceutique.

La recherche d'approches thérapeutiques s'est donc développée, essentiellement par la conjonction de l'effort des associations de malades et des progrès spectaculaires de la génétique moléculaire.

Voilà à peine une dizaine d'années, une liste très courte de locus impliqués dans la transmission de ces maladies (autosomale dominante ou récessive ou liées au chromosome X) n'attirait l'attention que de quelques rares généticiens, et encore plus rares ophtalmologistes. Une consultation typique pour un patient atteint de rétinopathie pigmentaire se déroulait de la façon suivante : le patient, souvent un jeune adulte, avait ressenti dès l'enfance des troubles d'adaptation à l'obscurité longtemps méconnus, puis un rétrécissement du champ visuel, conduisant parfois à un incident révélant la maladie ; cela aboutissait progressivement, dans un délai de 15 à 20 ans, à la perte de la vision centrale et donc à la cécité. Aucune perspective de stabilisation, et encore moins de guérison, ne pouvait être évoquée avec ces familles.

Progrès pathogéniques

La rétine comporte deux systèmes fonctionnant dans des conditions différentes. En lumière scotopique, donc dans la pénombre, les photorécepteurs à bâtonnets permettent de détecter des intensités lumineuses très faibles. Ce système ne possède pas une capacité de résolution importante et ne contribue pas à l'acuité visuelle. Il est essentiel à la vision périphérique et à la vision nocturne. Le système des photorécepteurs à cônes et la circuiterie rétinienne qui lui correspond prédominent en rétine centrale, au niveau de la macula. Il assure non seulement la vision colorée mais aussi la vision à haut contraste, l'acuité visuelle et toutes les fonctions visuelles en atmosphère lumineuse normale. Ce dernier système, dans les conditions actuelles d'éclairage, est largement prédominant.

A partir du début des années 1990, la découverte de mutations à l'origine de la rétinopathie pigmentaire a progressé à une vitesse impressionnante. Aujourd'hui, plus de 140 loci sont impliqués dans la genèse de ce groupe de maladies, dont seulement la moitié a été caractérisée. Le premier gène identifié a été celui de la rhodopsine, pigment engendrant la transduction visuelle au niveau du segment externe des bâtonnets. Environ 90 % des mutations identifiées s'expriment principalement dans les bâtonnets au niveau de la transduction ou de protéines de structure. Ce défaut génétique explique parfaitement la perte de la vision périphérique et surtout nocturne des patients. Le mécanisme de dégénérescence des bâtonnets par apoptose a été démontré en 1993. Le lien entre les mutations et l'apoptose n'est pas élucidé. Quant à la mort des cônes, à l'origine de la perte de vision centrale, aucune hypothèse et aucun mécanisme n'avaient été jusqu'ici validés. Rien ne permettait d'expliquer la perte secondaire de fonction des cônes, responsable de la disparition tardive de la vision centrale, donc de la cécité.

Recherches thérapeutiques

Thérapie génique

La conséquence la plus directe de la découverte de mutations causales a été d'ouvrir des perspectives en thérapie génique. De telles approches ont été entreprises depuis maintenant plusieurs années dans certains modèles animaux, correspondant de manière assez proche à la maladie humaine, avec une restauration anatomique et fonctionnelle partielle. Tout récemment, un travail marquant a été réalisé sur des chiens porteurs d'une maladie proche de l'amaurose congénitale de Leber, la plus grave des formes de rétinopathie pigmentaire, puisqu'elle conduit à la cécité dès la naissance. La réintroduction d'un gène exprimé, cette fois-ci, dans l'épithélium pigmentaire, et impliqué dans le métabolisme de la vitamine A, et donc des pigments visuels, a permis chez trois chiens de restaurer des fonctions électrophysiologiques partielles mais significatives et une compétence visuelle utilisable par l'animal. La restauration fonctionnelle est donc possible par thérapie génique. Restent cependant de nombreux écueils : établissement de sa sécurité, multiplicité des mutations et donc des approches à envisager, sans parler des problèmes posés par les mutations dominantes.

Neuroprotection

A côté de la thérapie génique de correction du défaut génétique, plusieurs stratégies ont été conçues pour limiter ou bloquer la perte des photorécepteurs. Leur ensemble peut être englobé sous le terme de *neuroprotection*. Elles font appel à la pharmacologie, à l'usage de facteurs de survie cellulaire, aux approches anti-apoptotiques et à la thérapie cellulaire.

La démonstration du rôle neuroprotecteur d'un facteur de croissance, le *fibroblast growth factor* (FGF), dans un modèle animal de rétinopathie pigmentaire, le rat RCS, remonte déjà à plus d'une dizaine d'années. Un autre facteur, le *ciliary neurotrophic factor* (CNTF) a aussi été utilisé avec succès dans plusieurs modèles animaux, et des essais cliniques sont en cours, faisant appel à la délivrance par des cellules encapsulées, libérant le facteur neurotrophique.

Les approches menées par l'unité de recherche 592 Inserm-Paris VI se sont orientées vers la limitation de la disparition des cônes. Le fait que dans le tableau clinique humain, et dans la plupart des modèles animaux, elle survienne après celle des bâtonnets, nous a conduits à envisager plusieurs hypothèses, parmi lesquelles nous en avons validé deux : celle d'une neurotoxicité initiale lors de la dégénérescence des bâtonnets ; et surtout celle d'une

dépendance trophique des cônes sur les bâtonnets. La transplantation de bâtonnets préparés en couche pure au vibratome, dans un modèle animal porteur d'une rétinopathie pigmentaire très brutale proche de certaines formes humaines, a été réalisée à un âge où l'ensemble des bâtonnets a dégénéré, et où les cônes ont seulement entrepris leur processus de dégénérescence. L'intervention ralentit de moitié la dégénérescence des cônes (Mohand-Saïd et coll., 2000).

Sur des modèles de cocultures, cet effet de survie exercé par le transplant de bâtonnets sur les cônes s'avère lié à la libération de molécules diffusibles de nature protéique. Il est important de souligner que cet effet s'exerce aussi longtemps que les bâtonnets, y compris ceux affectés par une mutation, sont viables (Mohand-Saïd et coll., 1998).

Il est donc vraisemblable que la disparition secondaire des cônes soit un événement lié à la privation d'un facteur de viabilité cellulaire. Cette constatation nous a conduits :

1. à envisager un protocole de recherche clinique sur la transplantation de photorécepteurs chez des patients ayant atteint le stade très tardif d'une rétinopathie pigmentaire ;
2. à tenter de caractériser la ou les molécules impliquées dans la signalisation qui assure la viabilité des cônes ;
3. à proposer des stratégies visant à protéger les bâtonnets de la dégénérescence, car une population résiduelle de bâtonnets de 25 % environ, même non fonctionnels, suffit à assurer la survie des cônes.

En parallèle, à la mise en œuvre d'essais de thérapie cellulaire, la caractérisation des facteurs de survie des cônes (appelés RdCVF : Rod derived Cone Survival Factor) a été entreprise. Plusieurs stratégies employant l'expression différentielle sur puces à acide désoxyribonucléique (ADN), la protéomique et surtout le clonage par expression, ont permis d'identifier des candidats.

L'identification de ces protéines, travaux soutenus par l'Inserm a occupé six longues années occupées à passer en revue systématiquement l'ensemble des gènes exprimés par la rétine normale afin de trouver ceux qui pouvaient bloquer la mort des cônes. La réalisation de ce programme, inspirées de la génomique fonctionnelle, a nécessité le développement d'outils et des protocoles spécifiques permettant de cribler les potentialités de plus de l'ensemble des gènes exprimés dans la rétine.

Une étape essentielle vers l'objectif thérapeutique vient d'être atteint par l'identification par clonage par expression d'un premier gène, Rod-derived Cone Viability Factor (RdCVF) qui est le sujet de la publication sous presse dans la revue *Nature Genetics*. Il s'agit d'une protéine sécrétée qui est exprimée spécifiquement par les bâtonnets et dont l'expression est perdue lorsque ceux-ci ont disparu suite à la première phase de dégénérescence. Le gène caractérisé, jusqu'ici inconnu (Txn16) appartient à la famille des thioredoxin-like, une nouveauté parmi les facteurs de survie des neurones. Des anticorps spécifiques ont permis de démontrer que ce gène est essentiel à la survie des cônes de la souris *rd1*.

Les nombreuses perspectives ouvertes par ce travail se classent selon deux axes principaux :

1. élucider son mécanisme d'action,
2. engager des recherches précliniques en vue de son utilisation comme thérapie des dégénérescences rétiniennes.

La protection indirecte des cônes peut être obtenue en préservant les bâtonnets mutés. La neuroprotection pourrait ainsi recourir à des facteurs neurotrophiques, FGF, CNTF et, comme la démontré notre groupe, *glial cell line derived neurotrophic factor* (GDNF) (Frasson et coll., 1999a).

Des approches pharmacologiques peuvent, elles aussi, être envisagées. Outre l'administration d'inhibiteurs de l'apoptose, nous avons observé qu'un bloquant des canaux calciques apporte un bénéfice validé sur un modèle animal porteur d'une mutation spécifique, rare chez l'homme, la souris *rdl* (Frasson et coll., 1999b).

Conclusion

Le décryptage des anomalies génétiques sous-jacentes au développement des rétinopathies pigmentaires a permis de concevoir des hypothèses physiopathologiques, d'utiliser des modèles existants, ou d'en créer, d'identifier des voies conduisant à la mort cellulaire, et de proposer des approches permettant de limiter cette perte cellulaire, tant au niveau des bâtonnets que des cônes. La préservation de la fonction des cônes représente un enjeu majeur, dont la portée englobe vraisemblablement la principale cause de cécité de l'adulte : la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Une population de 10 % des cônes pourrait suffire à mener une vie normale dans nos environnements lumineux. Il ne s'agit certes pas d'une approche curative de la maladie, mais dans une affection où aucune perspective thérapeutique n'a jamais pu être proposée, cette préservation représente déjà potentiellement un progrès. Les approches ne seront pas uniformes et l'identification des mutations spécifiques en sera l'élément dominant. A ce jour, en effet, l'évolution naturelle des rétinopathies pigmentaires n'a pas encore été améliorée par les progrès conceptuels que j'ai résumés. La perspective de prolonger l'usage d'une vision centrale permet cependant, aujourd'hui, de tenir au patient un discours crédible d'encouragement à la réadaptation sensorielle, en attendant de pouvoir mettre en œuvre les essais thérapeutiques visant à la préserver.

Remerciements : Saddek Mohand-Saïd, David Hicks, Serge Picaud et Georges Lambrou.

Références

Acland GM, Aguirre GD, Ray J et al. Gene therapy restores vision in a canine model of childhood blindness. *Nature Genet* 2001; 28:92.

Faktorovich EG, Steinberg RH, Yasumura D, Matthes MT, LaVail MM. Photoreceptor degeneration in inherited retinal dystrophy delays by fibroblast growth factor. *Nature* 1990 ; 347 : 83-6.

Cideciyan AV, Hood DC, Huang Y et al. Disease sequence from mutant rhodopsin allele to rod and cone photoreceptor degeneration in man. *Proc Natl Acad Sci USA* 1998 ; 95 : 7103-8.

Fontaine, V., Kinkl, N., Sahel, J., Dreyfus, H. & Hicks, D. Survival of purified rat photoreceptors *in vitro* is stimulated directly by fibroblast growth factor-2. *J. Neurosci.* **18**, 9662-9672 (1998).

Mohand-Said S, Deudon-Combe A, Hicks D, Simonutti M, Forster V, Fintz AC, Leveillard T, Dreyfus H, Sahel JA. Normal retina releases a diffusible factor stimulating cone survival in the retinal degeneration mouse. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1998, 95:8357-62.

Mohand-Said S, Hicks D, Léveillard T, Dreyfus H, Sahel JA. Selective transplantation of rod delays cone loss in a retinitis pigmentosa model. *Arch Ophthalmol*, 2000 ; 118 : 807-11.

Fintz AC, Audo I, Hicks D, Mohand-Said S, Leveillard T, Sahel J. Partial characterization of retina-derived cone neuroprotection in two culture models of photoreceptor degeneration. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2003 : 818-25.

Sahel JA, Mohand-Said S, Léveillard T, Hicks D, Picaud S, Dreyfus H. Rod-Cone interdependence : implications for therapy of photoreceptor cell diseases. *Prog Brain Res* 2001 ; 131 : 649-61.

Frasson M, Picaud S. Léveillard T et al. Glial cell line-derived neurotrophic factor promotes functional rescue of photoreceptors in a mouse model of inherited retinal degeneration. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1999a ; 40 : 2724-34.

Frasson M, Sahel JA, Fabre M, Simonutti M, Dreyfus H, Picaud S. Retinitis pigmentosa : rod photoreceptor rescue by a calcium-channel blocker in the rd mouse. *Nature Medicine* 1999b ; 10 : 1183-7.

Léveillard T., Mohand-Said S., Lorentz O., Hicks D., Fintz A-C., Clérin E., Forster V., Cavusoglu N, Chalmel F., Dollé P., Poch O., Lambrou G., Sahel J-A. Identification and Characterization of Rod-Derived Cone Viability Factor. *Nature Genetics*, July 04

LA VUE RETROUVEE GRÂCE A DES CELLULES DE FŒTUS

Des chercheurs américains de l'université de Louisville (Kentucky) assurent en effet avoir rendu la vue à une femme atteinte de rétinite pigmentaire - maladie génétique longtemps jugée irréversible. Un succès qui pourrait glacer les sangs de certains militants américains " pro-life " (pro-vie), puisqu'il repose sur l'utilisation de cellules prélevées sur un foetus humain issu d'un avortement. Largement répandue - des millions de personnes en sont atteintes à travers le monde, dont 40 000 environ en France -, la rétinite pigmentaire se caractérise par une dégénérescence à ce jour incurable des cellules photoréceptrices qui tapissent la rétine. Pour y remédier, les chercheurs planchent sur plusieurs pistes thérapeutiques notamment fondées sur le remplacement des cellules abîmées par d'autres qui se trouvent en état de fonctionner. C'est à une manipulation de ce type qu'a procédé, à Louisville, l'équipe de Robert Amarant en prélevant sur un foetus avorté un feuillet de cellules pour les greffer sur la rétine de l'un des deux yeux malades d'Elisabeth Bryant. Une intervention qui, réalisée il y a deux ans, permettrait aujourd'hui à cette femme jadis aveugle de voir " suffisamment pour lire, jouer à l'ordinateur ou consulter ses e-mails ". Six autres personnes atteintes d'une maladie de la rétine ont depuis lors subi une semblable greffe avec des résultats moins spectaculaires, mais jugés " bons".

Quoique jugé " intéressant " par les chercheurs en ophtalmologie, ce premier pas ne pourra être évalué qu'une fois publié dans une revue scientifique et, surtout, interprété. " Nous sommes en effet confrontés à deux hypothèses, explique le professeur José Sahel, spécialiste de la rétine à l'Inserm : soit les cellules greffées se sont intégrées à la rétine du receveur et se sont mises à revoir - ce qui me paraît moins probable-. Soit, plus vraisemblablement, elles ont eu un effet indirect en libérant des facteurs de survie qui ont favorisé la régénérescence des cellules mortes. " En toute hypothèse, cette technique ne pourra pas faire l'objet d'une large utilisation dans la mesure où le nombre de foetus " disponibles " est étroitement limité. C'est pourquoi les chercheurs, à ce stade, s'intéressent davantage à l'utilisation de cellules souches prélevées sur l'oeil d'humains adultes - même si cette voie de recherche n'en est actuellement qu'à ses débuts-

NEW SCIENTIST

<http://www.newscientist.com/>

DES CELLULES SOUCHES SE REGENERENT APRES AVOIR ETE TRANSPLANTEES

Des cellules-souche humaines transplantées dans la rétine de souris et de poussins se sont régénérées ce qui pourrait ouvrir la voie à des traitements des maladies dégénératives de l'oeil, selon une étude publiée aux Etats-Unis. "Nous avons transplanté des cellules-souche humaines très tôt dans le développement des animaux quand tous les éléments nutritifs et les signaux nécessaires pour les différencier étaient encore présents", a expliqué Brenda Coles, chercheurs travaillant avec le professeur Derek van der Kooy de l'Université de Toronto (Canada) dans une recherche dont les résultats ont paru dans les annales de l'Académie nationale américaine des sciences. "Quand les yeux des souris et des poussins ont achevé leur développement les cellules-souche humaines avaient survécu et formé des cellules qui dans la rétine réfléchissent la lumière et les images", a-t-elle ajouté. Les résultats de ces recherches devraient avoir des applications pour les futurs traitements des dégénérescences de l'oeil telles que la rétinite pigmentaire et la dégénérescence maculaire mais "cela sera long", a estimé cette scientifique. Désormais cette équipe de chercheurs cherche à savoir si des cellules de la rétine de souris saines continuent de se régénérer normalement quand elles sont transplantées dans les cellules jouant le rôle de photorécepteur chez des souris souffrant de maladie génératives de l'oeil.

Proceedings National Academy of Sciences:

<http://www.pnas.org/papbyrecent.shtml>

B. Cerveau et Conscience

CONSCIENCE ET PLAISIR Réflexions autour du thème de la conscience *Par Antoine FRATINI*

Affronter le thème de la conscience implique, indépendamment du type d'approche employé, un effort particulier d'abstraction, car il s'agit en effet « d'étudier la conscience par la conscience ». Mais est-il possible de ne pas influencer par notre observation et notre raisonnement la réalité de l'objet ainsi considéré ? Pour qu'une étude objective puisse aboutir dans ce cas il se révèle nécessaire un saut au delà de l'autoréférentialité du sujet.

Il me semble que les textes des professeurs Cabanac, Cardon et Singer publiés dans les derniers bulletins de l'Académie représentent des tentatives en ce sens. L'intervention du Pr. Cabanac peut même être interprétée comme un essai d'explication du phénomène de la conscience par le biais d'une approche scientifique pure, c'est à dire aboutissant à des possibilités de quantification du phénomène (signifiés par exemple par les concepts de degré de fièvre émotionnelle et tachycardiaque). Les résultats expérimentaux de cette recherche apparaissent tout à fait intéressants. Cependant, il est difficile de comprendre, en s'appuyant uniquement sur les transparents publiés dans le bulletin, quelle est la définition de départ que l'auteur attribue au terme « conscience ». Un tel point de départ, qui relève de la philosophie des sciences, est déterminant afin de vérifier la cohérence des résultats obtenus. Autrement dit, de quelle conscience ces travaux entendent-ils fournir la preuve expérimentale ? Comme l'énonce le professeur Singer (bulletin N° 87) « le terme de conscience comporte un grand nombre de connotations différentes allant de la conscience de ses propres perceptions et sensations à la conscience de soi (...) en tant qu'agent doté d'intentionnalité et de libre arbitre ».

Bien des philosophes auraient préféré définir la conscience non pas par le biais de réactions émotionnelles, mais plutôt par celui des raisonnements cognitifs qu'elle permet. Il est évident que la sphère des instincts liée aux émotions doit rejoindre par systèmes entrecroisés (comme par exemple dans le schéma du prof. Cardon - bulletin N° 87) le domaine du cognitif. Il est probable que la conscience constitue une propriété émergente de la totalité des systèmes inclus dans ces deux grandes fonctions et couplée avec le hasard des circonstances touchant au rapport du sujet vivant avec son milieu. Les critères de base posés par le prof. Cabanac sont très significatifs, ne serait-ce que parce qu'ils rejoignent une des grandes intuitions de Freud sur l'importance et l'universalité chez les êtres vivants du *principe de plaisir*. Il me paraît opportun de rappeler à l'occasion que ce même principe, semblable au principe d'entropie de la physique et qui correspond à une recherche constante de diminution de tension à l'intérieur de

la psyché, règle selon Freud une grande partie de la vie psychique des individus. En particulier, ce principe règne en souverain au niveau inconscient, tandis qu'au niveau conscient gouverne le *principe de réalité* dont la caractéristique principale est d'évaluer l'opportunité des décharges pulsionnelles par rapport aux circonstances réelles, spatio-temporelles, dans lesquelles se trouve le sujet.

Plaisir/déplaisir sont à un niveau de conscience archaïque les deux pôles qui orientent toute action et le moteur de toute émergence de propriétés nouvelles chez un organisme vivant. Dans le conflit entre cette modalité hédoniste et les avatars de la vie naît la conscience comme « troisième terme », comme évaluation intérieure d'une situation extérieure comprenant le sujet. A ce niveau la conscience représente déjà un raisonnement élémentaire : « la moindre tension, c'est quoi ? » A cet endroit le principe de la moindre tension fait loi, mais doit aussi être mis en relation avec les conséquences futures de l'action. Ainsi s'instaure un monde intérieur complexe ; ainsi l'organisme acquiert une âme principalement par la mise en mémoire des expériences au niveau du pôle plaisir/déplaisir et de leur mise en perspective par rapport à la situation présente. Il est donc nécessaire que la tension psychique ne s'éteigne jamais complètement et que les traces des expériences passées soient gardées à l'intérieur du système afin de rendre possible l'évaluation des situations présentes et futures¹.

Or, un tel raisonnement élémentaire serait déjà reconnaissable, selon le père de l'éthologie Lorenz, chez les poissons. En effet, l'auteur cite le fameux exemple du poisson-bijou déposant la proie de sa bouche pour ensuite avaler le ver qui s'y trouvait aussi².

D'autre part, si la présence d'émotion ne suffit pas à expliquer le phénomène de l'autoconscience, le pur raisonnement logique ou la capacité de calcul ne peuvent être considérés à eux seuls comme des signes de conscience, comme le montre le cas de l'ordinateur. Une fois de plus, il me faut répéter que le jour où l'ordinateur éprouvera de la douleur, alors peut-être pourra-t-on parler à juste titre d'ordinateur intelligent. Mais pas avant. Ce que confirme à mon sens par la présence d'un « système générateur d'émotions » posée par le Pr. Cardon dans son schéma du système (bulletin N° 87).

En conclusion, ce que nous appelons couramment « conscience », mais qu'il conviendrait de nommer « autoconscience » ou « double conscience »³, nous apparaît toujours plus comme une propriété émergente provenant de la combinaison, en grande partie encore à découvrir, de fonctions appartenant aussi bien à la sphère des émotions et des instincts qu'à celle du cognitif et obéissant à la fois aux principes de réalité et de plaisir.

Antoine Fratini

Octobre 2004

¹ Le phénomène analytique de la *répétition* détermine souvent la forme de bien des névroses : ces événements négatifs répètent, nous révèle Freud, des conflits passés que le sujet n'arrive pas à se remémorer. Les gestes et les situations apparemment objectives de la vie « parlent » à la place du sujet.

² Cité in Derek Denton, *L'émergence de la conscience de l'animal à l'homme*, Flammarion p167

³ Voir à tel sujet mon article *Parola e psiche* in www.aepsi.it.

DEMAIN L'HOMME NEURONIQUE ?

Par René TREGOUËT

Sénateur honoraire, fondateur de la commission prospective au Sénat

Pour les chercheurs du Medialab Europe, filiale du MIT américain, le cerveau est un système cybernétique ultra-complexe dont on pourra demain modifier le fonctionnement et peut-être décupler les performances. Ces objectifs, qui relevaient encore de la science-fiction il y a 10 ans, semblent aujourd'hui envisageables dans un futur sans doute plus proche qu'on ne l'imagine. Il est vrai que depuis une décennie la recherche dans ce domaine a fait des pas de géants. S'appuyant à la fois sur les progrès de la microélectronique et des neurosciences, les chercheurs sont notamment parvenus à réaliser des interconnexions entre puces électroniques et neurones et ont montré que l'on pouvait modifier de manière contrôlée l'état électrique d'un neurone grâce à une puce et vice et versa.

D'autres recherches sont même allées plus loin et ont montré qu'il était possible de cultiver des cellules nerveuses sur un substrat électronique, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles interfaces bioélectroniques. Aujourd'hui, ces percées de la bionique commencent à déboucher sur des applications concrètes et sur de nouvelles thérapies pour les personnes victimes de maladies neurologiques ou d'accidents ayant lésé leur moelle épinière. C'est ainsi qu'au cours de ces dernières années des expérimentations remarquables aux Etats-Unis, en France et en Grande Bretagne ont permis de restaurer partiellement la mobilité de personnes paralysées grâce à des dispositifs neuro-électroniques capables de traduire et de transmettre aux muscles l'influx nerveux défaillant.

Des scientifiques suisses ont également présenté, fin 2003, un œil artificiel directement branché sur le cortex qui pourrait rendre au moins partiellement la vue aux aveugles de naissance. Dans le domaine des maladies neurologiques, l'électrostimulation a été utilisée avec succès pour traiter des malades atteints de certaines formes de la maladie de Parkinson rebelles aux autres traitements.

D'autres chercheurs aux USA travaillent sur un "pacemaker du cerveau" qui pourrait lutter contre la dépression et l'anxiété en stimulant les centres cérébraux du bien-être. Il faut aussi évoquer de récentes et fascinantes expériences sur le singe qui ont montré qu'il était possible, à l'aide d'un dispositif neuro-électronique et après un apprentissage spécifique, d'effectuer une série de commandes précises directement par la pensée, ce qui ouvre évidemment la voie vers une extraordinaire révolution scientifique et technique dans tous les domaines d'activités humaines.

Enfin, des chercheurs du Centre de recherche des neurosciences de l'université de Californie viennent d'annoncer qu'ils avaient expérimenté avec succès sur le rat une "neuro-puce" capable de se substituer à l'hippocampe pour reproduire certaines fonctions de mémorisation. Selon le Professeur Berger, qui dirige ces recherches, la question n'est plus de savoir si l'utilisation de neuro-prothèses et de neuro-implants est possible chez l'homme, mais quand ce saut scientifique aura lieu. (Voir Wired).

Il est pour sa part convaincu que, d'ici 15 ans, il sera possible d'utiliser des neuro-prothèses et des implants électroniques sur l'homme pour réparer les dysfonctionnements de notre cerveau provoqués par l'âge ou les maladies neuro-dégénératives. Mais à mesure qu'elles progressent, ces recherches, si elles soulèvent d'immenses espoirs, posent également de redoutables questions éthiques car réparer des dommages neurologiques causés par l'âge, la maladie ou l'accident est une chose mais vouloir contrôler les émotions et, pourquoi pas, améliorer certaines facultés mentales, ou lire dans les pensées, en est une autre.

Même si le cerveau comporte des aires spécialisées de mieux en mieux connues et semble se comporter, à un certain niveau d'organisation, comme un super-ordinateur, nous oublions un peu vite que c'est un système autotélique, conscient de son propre fonctionnement et capable de s'autoreconfigurer, dans certaines circonstances, avec une plasticité stupéfiante et bien supérieure à celle de nos pauvres ordinateurs.

En outre, comme l'a montré de manière si remarquable le grand neurobiologiste Antonio Damasio (lire " L'inscription corporelle de l'esprit " et " Spinoza avait raison"), nos facultés et nos performances intellectuelles sont inséparables de nos émotions, de nos sentiments et de notre singularité existentielle.

Si nous devons bien entendu nous réjouir des extraordinaires progrès des neurosciences, et de perspectives thérapeutiques immenses qui en résultent, nous devons également réfléchir à la mise en place d'un cadre neuroéthique que j'ai déjà appelé de mes vœux mais qui, aujourd'hui, devient indispensable si nous voulons poursuivre l'exploration scientifique de notre cerveau en intégrant cette dimension éthique irréductible.

René Trégouët

C. Retour sur les fractales, hommage à Mandelbrot

LE MONDE EN 2,7 DIMENSIONS

Qu'y a-t-il de commun entre nos poumons, le béton high-tech et certains murs antibruit sur le bord de l'autoroute ? Réponse : "l'éponge de Menger ". Il s'agit d'un concept mathématique tout droit sorti de l'imagination féconde d'un certain Karl Menger (1902-1985), un mathématicien américain d'origine autrichienne. Sa forme n'est pas sans rappeler celle de son homonyme ménager : un cube percé d'une multitude de pores, tous connectés les uns aux autres. Une curiosité née au début du siècle, qui inspire aujourd'hui pneumologues, constructeurs d'automobiles ou encore compagnies de travaux publics. A l'origine de ce pavé poreux, une recherche de l'impossible. Peut-on obtenir une surface infinie dans un volume fini? Oui, a répondu le mathématicien viennois.

Si l'on considère un cube, la superficie qui lui est associée est celle des six côtés qui le composent. A volume plus grand, surface plus étendue, l'argument semble entendu. Comment augmenter l'une sans toucher à l'autre ? Karl Menger propose une recette infallible : si l'on partage chacune des arêtes en trois parties égales, chaque face sera formée d'un damier de neuf carrés. Commençons par vider celui du milieu. En ajoutant les parois de cette partie évidée, la superficie de la structure est plus grande que celle du cube d'origine. De ce fait, nous augmentons la surface, sans faire varier le volume...

Continuons l'opération : chacun des huit carrés restants est divisé en un minuscule damier de neuf, dont la figure centrale est à nouveau évidée... et ainsi de suite, jusqu'à atteindre des portions microscopiques.

A force de creuser dans le volume de départ, la surface ne cesse d'augmenter, certes d'une quantité de plus en plus petite, mais...sans aucune limite. Au final, c'est une dentelle tridimensionnelle qui ne déborde pas du cube d'origine. La dimension d'un tel objet ne peut pas être un nombre entier (1, 2 ou 3), elle est comprise entre 2 et 3... De la même manière, la trouvaille de Menger, scrutée sous toutes les coutures, accuse une dimension de 2,7. Au début des années 1970, Benoît Mandelbrot, mathématicien français d'origine polonaise, donne une dimension nouvelle à ces différentes démarches en les intégrant dans une théorie globale, dite des " fractales " (du latin fractus, brisé). Celles-ci foisonnent dans la nature, depuis la structure en double hélice des brins d'ADN jusqu'aux montagnes ou encore la côte naturelle de Bretagne, une ligne de faille, un nuage, un fleuve ou la répartition des galaxies. En outre, ces objets présentent une autre particularité : leur autosimilarité.

Chaque partie a une structure semblable à celle de l'ensemble, exactement comme si un détail représentait, à une plus petite échelle, la totalité. Le chou-fleur en est une bonne

illustration. Les échanges entre deux milieux biologiques séparés par une membrane sont également conditionnés par la surface de contact. Commence alors la deuxième vie des fractales : les physiciens s'en sont emparés pour inventer des objets de la vie quotidienne, améliorer le rendement d'une foule d'autres et comprendre le fonctionnement de certains organes humains comme les poumons. Les alvéoles pulmonaires sont l'exemple type de structure fractale. Elles présentent une très grande surface pour un volume limité: en étudiant les lois de la diffusion à travers une surface aussi irrégulière, l'équipe tente de comprendre l'oxygénation du sang.

Autre application étonnante : les gratte-ciel. Des tours de 500 mètres de hauteur pourront être érigées grâce à un ciment de structure fractale, imaginé au sein du laboratoire PMC par Jean-Pierre Korb et développé par le groupe des Ciments Lafarge. " Un béton traditionnel a des grains de différentes tailles et peut supporter 30 MPa, c'est-à-dire le poids de 3 millions de kilos par mètre carré. « Un critère qui détermine l'épaisseur d'un pont, par exemple ", précise le chercheur. Le béton dit " de poudre réactive " - la toute dernière nouveauté - peut résister à plus de dix fois cette charge... Le secret de ce matériau hyper résistant ? Sa structure fractale : les grains qui le composent ont tous la même taille, ce qui lui octroie la propriété de présenter la même forme à différentes échelles. Avec ce béton high-tech, place aux ouvrages d'art effilés comme des lames d'acier tendues entre deux rives et aux gratte-ciel susceptibles de s'élever à des hauteurs dix fois supérieures à celles de nos bâtiments d'aujourd'hui. Les fractales n'ont pas fini d'enflammer l'imagination des mathématiciens et des physiciens.

L'Express

<http://www.lexpress.fr/>

NDLR: les 2,7 dimensions concernent le cube de Menger , ce ne sont pas encore les dimensions de notre monde.