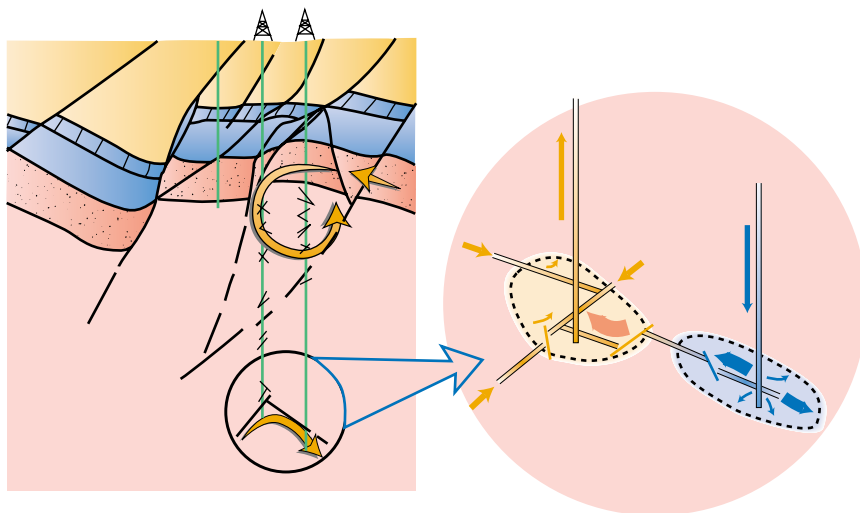




Dispositif géothermique profond de Soultz-sous-Forêts. Dans la partie sédimentaire, les structures sont bien connues du fait d'un grand nombre de puits pétroliers et de profils de géophysique. Dans le granite, seuls les forages indiquent la localisation des grandes failles. Au cœur de ces zones, des fluides salés circulent lentement dans la partie profonde du Fossé rhénan (flèches jaunes) depuis des millions d'années. Dans le dispositif géothermique, l'eau est injectée dans le premier puits. Elle circule au sein du milieu fracturé qui constitue un échangeur de chaleur. Elle remonte ensuite dans le second puits, vers la surface, où elle sera à nouveau injectée. À Soultz, le réseau diffus de fractures assure la connexion entre les deux puits : le temps de transit est long, l'échange important, la participation des fluides naturels est prépondérante.

À la suite de l'injection, le puits a été remis en production, et on a constaté que les injections massives ont augmenté très nettement la productivité naturelle du granite, qui est passée de 0,5 à 8 litres par seconde dans des conditions de pression équivalentes. Les échantillonnages et les analyses ont montré que les eaux injectées se sont mélangées aux fluides salés du granite. Très vite, au cours de la production, le pourcentage de fluide issu du granite a augmenté, indiquant par là que le système de failles du granite constitue un véritable réservoir.

Contrairement aux autres sites RCS, l'implantation du second puits de l'échangeur a été décidée à partir des résultats de l'étude du premier puits, en tenant compte des directions des failles majeures. La distance record entre les deux puits est de 450 mètres. Durant l'été 1995 les deux puits ont été connectés et les expériences ont été menées en circulation bouclée : on a injecté ce qui sortait du puits producteur dans le puits d'injection. On a constaté que la variation du débit d'injection influait sur le débit de production, qui pouvait être maintenu à plus de 20 litres par seconde.

La démonstration était patente : la communication entre les deux puits s'est établie au travers d'un réseau de fractures complexes dont le volume est suffisamment grand pour que le temps de cheminement y soit important. Ce

volume peut être estimé à un minimum de 15 000 mètres cubes et la taille de la surface d'échange est d'environ plusieurs kilomètres carrés. Ces chiffres sont de très loin supérieurs à ceux obtenus dans les autres sites RCS.

Le projet de recherches en géothermie profonde de Soultz a donc permis de réaliser le plus grand échangeur géothermique mondial. La température est encore trop faible (160 °C) à la profondeur de 3 500 mètres pour assurer une production rentable d'électricité. Toutefois, la taille de l'échangeur permettra, en optimisant les paramètres du dispositif, d'assurer la viabilité du système.

Pourquoi le site de Soultz semble-t-il plus prometteur que les autres ? La différence principale tient au fait que la circulation ne se fait pas dans un milieu compact et homogène, comme celui des roches volcaniques, mais dans un système préfracturé. La présence d'un important réseau de fractures constitue des drains actifs favorisant le développement d'un échangeur de grande taille. La valorisation de ce réseau au cours de l'implantation des puits a pris plusieurs années, mais les résultats sont convaincants. Toutes les bases sont ainsi jetées et, d'ici quelques années, un nouveau concept de production d'électricité à partir de la chaleur du granite situé à quelques kilomètres de profondeur pourrait être validé à Soultz.

Équipe de projet Soultz, BRGM



Unités mixtes de recherche CNRS / Entreprises

Sur les traces de Lavoisier

La création de la chimie moderne par Lavoisier était-elle une recherche suffisamment fondamentale pour le CNRS d'aujourd'hui? Certainement. Et ses études du salpêtre, de la poudre à canon ou du tabac? Là, nous hésitons, considérant que l'industrie est davantage concernée. Pourtant les correspondances du père de la chimie moderne démontrent que ce dernier ne séparait pas la recherche fondamentale du transfert de connaissances vers l'industrie. De même, Pasteur oscilla entre la science fondamentale et la science appliquée, entre la microbiologie, la médecine et les études du vin, du ver à soie...

Pourquoi le CNRS tout entier ne suivrait-il pas l'exemple de ses grands anciens? Pourquoi le transfert immédiat de résultats, convertis en produits industriels, ne côtoierait-il pas l'accroissement des connaissances? Les unités mixtes de recherche, fondées entre le CNRS et les industriels, sont un moyen d'aider le pays à valoriser économiquement sa recherche. Ce n'en est toutefois que la forme la plus poussée... qui ne doit pas faire oublier les autres possibilités.

Les plus élémentaires formes de collaboration sont la consultance à titre personnel ou le contrat de recherche, qui engage généralement un chercheur ou une équipe. Il y a dix ans seulement, on imaginait que la recherche pouvait être «pure» et l'on prétendait que les collaborations de la recherche et de l'industrie étaient contre nature. Toutefois, après les Assises de la recherche, en 1981, il fallut moins de cinq ans pour que les chercheurs admettent que leurs travaux puissent être valorisés et pour que les entreprises comprennent l'intérêt de la collaboration : de 350 par an, le nombre de contrats des unités du CNRS est passé à plus de 3 000. Les blocages idéologiques étant ainsi tombés, il fallut organiser les relations afin de satisfaire les deux parties.

Les grands accords de collaboration entre le CNRS et les entreprises s'ajoutèrent alors au tout petit arsenal déjà en place. Dans ce cadre, les deux parties développent en commun des programmes cofinancés ; toutefois, pour mettre en œuvre ces programmes, il fallait restruc-

turer les structures d'interface. Ainsi naquirent la Direction de la valorisation, la Mission des relations avec les entreprises, le Délégué aux affaires industrielles et le Conseil du partenariat avec les entreprises.

Puis le monde scientifique et technique sentit le besoin de programmes communs, tel *Bioavenir*, qui fut défini, avec le CEA, l'INSERM, l'Institut Pasteur, des université et un industriel, le Groupe *Rhône-Poulenc*. Ce programme, qui couvrirait ainsi les domaines santé, biochimie, agrochimie et méthodologie, déboucha sur la découverte de tests simples pour le criblage des principes actifs de médicaments, la mise au point de nouvelles formes galéniques, des résultats sur la résistance végétale aux herbicides et la production d'acides gras spécifiques. Au total, plus de 350 publications et communications, ainsi que 150 brevets!

D'autres programmes de ce type naîtront en 1998, car la Direction du CNRS n'a pas le sentiment qu'elle doit se contenter d'entretenir les laboratoires ; un rôle d'animation scientifique lui est dévolu. Pourquoi de tels programmes, plutôt qu'un ensemble de contrats ponctuels? Parce que la durabilité des collaborations et l'engagement d'une partie notable de l'institution imposent des réflexions : notamment, une collaboration qui se pérennise ne doit pas verser dans la prestation de services, et les laboratoires du CNRS ne doivent pas devenir des centres techniques et se substituer à ceux qui existent. Les objectifs de la recherche doivent être partagés, et c'est un atout pour notre pays si des actions concertées de recherche profitent aux entreprises nationales.

DES THÈMES MOBILISATEURS

Avec les unités mixtes de recherche, c'est à nouveau la définition d'un thème mobilisateur, pour une période assez longue, qui engendre les contrats de collaboration. Ayant identifié des besoins spécifiques, en personnels de recherche ou en équipements, l'industriel et le CNRS s'accordent sur les modalités de l'unité ; souvent l'entreprise identifie des règles de confidentialité, tandis que le CNRS



Guy Aubert, directeur général du CNRS.

impose ses règles de conduite de la recherche : présence d'un conseil scientifique, etc.

Le choix du site est important, car un laboratoire mixte est souvent une vitrine. Selon les cas, le laboratoire mixte est installé chez l'entreprise partenaire ou dans un centre de recherche publique, en France ou à l'étranger. Comme dans beaucoup d'autres laboratoires, deux endroits sont stratégiques : le coin revues des bibliothèques, où se fait la veille scientifique, et la cafétéria, où naissent de nombreuses idées, lors de réunions informelles.

Faut-il généraliser les laboratoires mixtes? Remarquons tout d'abord que ce type de structure est dans l'air du temps et s'inscrit dans une évolution d'ensemble de l'organisation de la recherche. L'évolution a commencé en physique, où le coût des gros instruments a nécessité le regroupement de dizaines, voire de centaines de chercheurs. La chimie a connu ce type d'évolution, et la biologie y vient, tandis que les sciences de l'homme et de la société voient également le rassemblement de chercheurs naguère dispersés.

Aujourd'hui, 17 unités mixtes sont actives, et huit ont été fermées, après la fin de leur mission, à la satisfaction des deux partenaires. Généralement les décisions de création ont été rapides et, une fois les équipes au travail, les transferts scientifiques et techniques se sont faits comme pour les unités propres ou associées : les brevets, par exemple, ont valorisé les résultats quand ceux-ci s'y prêtaient et quand les entreprises avaient la volonté de protéger ainsi les travaux.

Les textes qui suivent montrent les résultats obtenus dans quelques unités mixtes de recherche ; on le verra clairement, la collaboration est souvent la garantie d'une recherche de qualité : comme le disait Antoine de Saint-Exupéry, «il n'est de fertile que la grande collaboration de l'un à travers l'autre.» ■

Guy AUBERT

À la recherche de la RMN de l'or

Des études à la limite du possible pour affiner la compréhension des molécules et perfectionner les appareils de RMN.

Les unités mixtes CNRS-entreprises associent généralement deux partenaires de même poids. Toutefois, dans le cas de l'association entre la Société *Bruker* et le CNRS, la problématique était différente, car l'industriel est une entreprise de 400 personnes : comment la marier à une institution, le CNRS, qui compte plus de 11 500 chercheurs ? Pis encore, comment formaliser une collaboration effective depuis longtemps, alors que l'un des deux partenaires n'avait pas les moyens de subvenir à l'entretien d'un nouveau laboratoire ?

La réponse tient tout entière dans la spécificité de la Société *Bruker*, qui possède un « marché de niche » : ses appareils d'analyse par résonance magnétique nucléaire (RMN) sont si stratégiques, en recherche, que la collaboration est plus qu'une affaire d'argent ; c'est un dialogue permanent. Les chercheurs CNRS du Laboratoire mixte de Strasbourg n'obtiendraient pas leurs résultats sans les matériels et le soutien technique de la Société *Bruker* et, cette dernière, ne conserverait pas son avance technique sans les compétences des chercheurs qui utilisent leurs appareils.

L'EFFET CAFÉTÉRIA

Plus qu'un accord de programme, c'est un accord d'hommes qui a été conclu. Pierre Granger, qui dirige aujourd'hui l'unité mixte à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg connaissait la Société *Bruker* depuis sa création. Celle-ci commença par la construction d'électro-aimants dans un garage, à Karlsruhe. La fusion de *Bruker* avec la Société suisse *Spectrospin*, de Zurich, conduisit, à la fin des années 1960, à l'aventure

de la RMN. En 1971 fut créé un nouveau centre, en France, à Wissembourg, sous l'impulsion et la direction de M. Reithler, qui avait été un collègue de P. Granger à l'Université de Nancy.

En 1973, Christian Brevard, qui avait effectué sa thèse chez Jean-Marie Lehn, à Strasbourg, revint d'un séjour post-doctoral au Canada et entra chez *Bruker*. Avec P. Granger, il se passionna pour des analyses RMN complexes du xénon, démontrant du même coup que la RMN s'appliquait à d'autres noyaux atomiques que ceux d'hydrogène ou de carbone 13.

Comment développer cette collaboration, alors que l'un des partenaires était professeur d'université et l'autre industriel ? C'est au siège du CNRS, quai Anatole France, et, plus précisément, à sa cafétéria, que Ch. Brevard et la Direction chimie du CNRS imaginèrent une solution : la création d'une structure conceptuellement unique, mais géographiquement divisée entre l'Université Louis Pasteur et le

Laboratoire d'applications de la Société *Bruker*, à Wissembourg ; le CNRS apporterait les compétences de ses chercheurs, et la Société *Bruker* ses appareils et des ingénieurs pour les perfectionner en permanence, en fonction des besoins des scientifiques utilisateurs.

Ainsi était dégagé un objectif capable de motiver des chercheurs du CNRS et des ingénieurs de recherche privée : faire progresser la RMN des noyaux exotiques en phase liquide ou solide, tout en imaginant des équipements pour spectromètres RMN. Lorsque l'Unité mixte fut inaugurée, en 1988, par le ministre de la Recherche Hubert Curien, Ch. Brevard, qui était entre-temps devenu le président du directeur de *Bruker*, lui demanda expressément de préserver coûte que coûte la cafétéria du CNRS. N'était-ce pas là qu'on avait trouvé le moyen de formaliser une ancienne amitié ?

LES FRUITS DE LA RECHERCHE

Dans le nouveau laboratoire, que fait-on ? On pousse la RMN à ses limites. La méthode consiste à placer un échantillon dans un champ magnétique, afin d'orienter le spin des noyaux atomiques (qui possèdent un moment magnétique, équivalant à un petit barreau aimanté, qui s'aligne avec le champ magnétique), puis à faire absorber des ondes radio, qui écartent temporairement ces spins de leur orientation d'équilibre. La réaction des noyaux en fonction de la fréquence des ondes radio renseigne sur l'environnement des atomes et, notam-

ment, sur la nature chimique des noyaux voisins : un atome de carbone 13 lié à un atome d'oxygène réagit différemment d'un atome de carbone 13 lié à un atome d'hydrogène.

Ce principe, bien connu pour les échantillons dissous dans un solvant, est plus difficile à mettre en œuvre pour les échantillons solides, parce que les signaux RMN de nombreux noyaux ne sont notables que si l'on utilise des champs magnétiques intenses et stables. Pour obtenir ces champs magnétiques, on injecte du courant électrique dans des bobines supraconductrices, où il circule sans pertes. L'enregistrement des spectres RMN peut durer plusieurs jours, ce qui suppose que le champ magnétique reste parfaitement stable. Pour évi-



1. Image 2D d'une tranche d'orange observée sur un spectromètre *Bruker RMN AVANCE 300 SWB*.

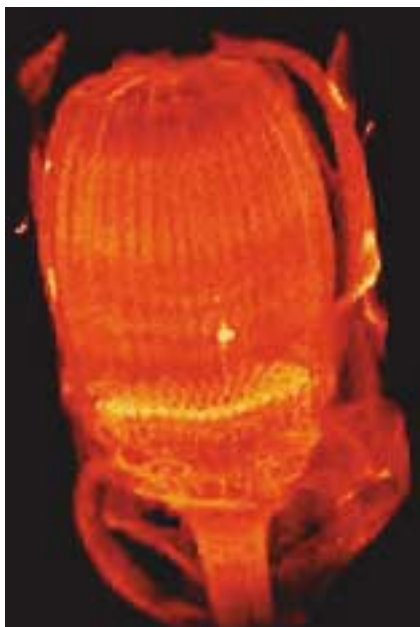
ter les dérives lentes, inévitables, qui nuisent aux mesures, on utilise, pour les solutions, la résonance du deutérium du solvant afin de maintenir les conditions optimales d'observation. Mais comment pallier ces dérives, quand on étudie des solides, qui nécessitent des analyses très longues? Le problème fut résolu à Wissembourg : on introduit dans la sonde de détection, à côté de l'échantillon, une petite ampoule qui contient le deutérium sur lequel on peut caler l'électronique : un œuf de Colomb moderne, employé aujourd'hui sur les appareils fabriqués en série.

Ce type de travail est exemplaire : les chercheurs de Strasbourg se sont spécialisés dans les analyses difficiles, et les ingénieurs de Wissembourg dans la résolution des problèmes techniques dégagés lors de ces recherches. L'Unité mixte est ainsi comme une écurie de *Formule 1* : les chercheurs et les ingénieurs sont comme des pilotes de course, et il est vrai que les spectromètres RMN sont des machines au moins aussi perfectionnées que les bolides à quatre roues.

LA RMN DES NOYAUX EXOTIQUES

Dans cet esprit, l'Unité mixte de Strasbourg s'est surtout intéressée à la RMN multinoyaux. De quoi s'agit-il? On enseigne classiquement la RMN pour l'hydrogène, le carbone, le fluor ou le phosphore, en laissant entendre que d'autres atomes sont accessibles à l'analyse, mais les chercheurs de Strasbourg démontrent quotidiennement que la plupart des éléments de la Classification périodique sont également observables par RMN si l'on dispose d'un matériel et d'une méthodologie appropriés. Les deux exemples suivants montrent comment des applications industrielles surgissent parfois quand les chimistes font des études fondamentales

À l'Institut Le Bel, de Strasbourg, M. Braunstein et ses collègues étudiaient les propriétés catalytiques d'agrégats complexes, contenant du cobalt, du fer ou du ruthénium, liés à une partie organique, c'est-à-dire composée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène et de quelques atomes tels que le phosphore. Le Laboratoire mixte pouvait-il les aider, grâce à la RMN multinoyaux, à accéder à des connaissances approfondies sur leurs molécules? Après de longs mois de travail, le Laboratoire mixte parvint à interpréter les spectres de ces agrégats, et les chimistes voulurent remplacer des atomes de phosphore par des atomes d'azote dans la partie organique. Toutefois ils ne parvenaient pas à démon-



2. Image 3D d'une dent-de-lion fermée observée sur un spectromètre Bruker RMN AVANCE 300 WB.

trer que la réaction avait eu lieu. Le Laboratoire mixte proposa alors de faire directement cette expérience dans un spectromètre RMN. On vit alors que des signaux apparaissaient, subsistaient une dizaine de minutes avant de disparaître : c'était la preuve que le composé cherché était formé, mais instable. Utilisant cette information, les chimistes modifièrent leurs méthodes et obtinrent des composés stables. Simultanément l'analyse des spectres du phosphore conduisait à la compréhension d'un certain type de spectres restés inexplicables.

Toute cette recherche aurait été impossible sans l'utilisation d'ondes radio de fortes puissances (de l'ordre du kilowatt). Naguère ces ondes étaient produites par des amplificateurs à lampes, mais, vu le développement de la RMN du solide, les ingénieurs de Wissembourg ont mis au point des émetteurs transistorisés.

D'autre part, comme la bande de fréquences à couvrir pour observer un noyau était très grande, il fallait employer des impulsions radio très brèves, qui faisaient initialement claquer les bobines d'émission et de réception des ondes radio. Le problème, ramené à Wissembourg, a conduit à la mise au point de sondes adaptées à ces puissances élevées.

Le Laboratoire a également été sollicité pour étudier le fonctionnement des électrodes des batteries au lithium, aujourd'hui présentes dans nombre d'équipements électroniques ou, même, dans les véhicules électriques. La RMN du lithium solide permettrait-elle de com-

prendre le comportement des matériaux des électrodes (du pentaoxyde de vanadium V_2O_5) où vient s'introduire le lithium?

Après un travail de thèse, l'analyse RMN donna un éclairage nouveau à la compréhension de ces phénomènes. Il a été montré que, contrairement à l'analyse aux rayons X sur des cristaux purs, le matériau utilisé était en fait un mélange de plusieurs phases présentant des atomes de lithium dans des sites n'ayant pas les mêmes propriétés.

Cette étude s'est prolongée par l'analyse des électrodes au lithium avec des matériaux magnétiques. L'analyse par RMN de tels matériaux est contre nature, à la température ambiante : ces matériaux contiennent des atomes magnétiques, tel le nickel, où les atomes de lithium interagissent avec les électrons non appariés. Toutefois les expériences à température ambiante ont permis de trouver de trouver le nombre d'atomes de nickel voisins des atomes de cobalt. Il fut notamment montré que le nickel et le cobalt ne sont pas mélangés de façon homogène. Les chimistes ont repris leurs méthodes de fabrication.

Pour toutes ces études, les appareillages sont mis à rude épreuve. Dans certains cas, pour obtenir des signaux mieux identifiants, on fait tourner les échantillons jusqu'à 20 000 tours par seconde : les appareils doivent résister à des forces centrifuges atteignant plusieurs tonnes par centimètre carré, d'où des ruptures accidentelles qu'il faut réparer. Souvent, également, quand les puissances appliquées sont excessives, les sondes fondent. L'assistance des ingénieurs de Wissembourg est indispensable. Et pour certains matériaux semi-conducteurs, tels le tellure de cadmium ou le tellure de zinc, on ignorait comment régler les sondes et adapter la bobine de détection à l'échantillon. Les améliorations des mesures ont suscité de nouveaux progrès et débouché sur des perfectionnements des appareils.

Avec ces instruments sans cesse modifiés, l'équipe alsacienne est à la quête d'un Graal : la RMN de l'or, encore jamais effectuée. Un physicien américain semble avoir obtenu un signal RMN qui correspondrait à des noyaux de ce métal. Il faudra, sans aucun doute, de nombreux aller-retour entre Strasbourg et Wissembourg pour découvrir le signal RMN de l'or. ■



Bulles et neurones

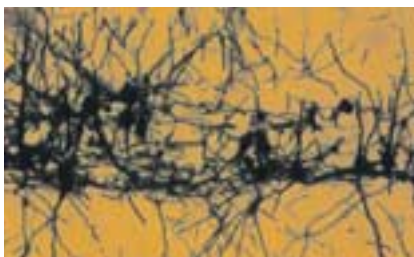
Six laboratoires pour explorer de grands problèmes de chimie, de biologie végétale, de neurobiologie et de thérapie génique.

« On est plus souvent dupe par la défiance que par la confiance », disait le cardinal de Retz. C'est la raison pour laquelle le Groupe Rhône-Poulenc a toujours collaboré avec les laboratoires du CNRS sous la forme de contrats... jusqu'à ce que naisse le cadre d'unité mixte CNRS-entreprises. Le Groupe Rhône-Poulenc fonda alors le Laboratoire de précurseurs organométalliques de matériaux, dirigé par Robert Corriu, puis cinq autres unités mixtes. Dans tous ces laboratoires, la confiance est totale : les chercheurs publient librement parce que la publication de leurs résultats, d'une grande qualité, est aussi une publicité pour le Groupe. Mieux encore, confiant dans ses forces, le Groupe n'a pas hésité à implanter ses unités mixtes dans des sites aussi remarquables que les hôpitaux, les grands centres de recherche ou à proximité des universités américaines les plus prestigieuses.

Le Laboratoire des Fluides complexes, par exemple, a été inauguré en mars 1996, dans un Centre Rhône-Poulenc... tout près de Princeton. Dirigé par Paul-Joël Derian, il réunit une vingtaine de chercheurs qui se préoccupent de physico-chimie de la formulation. Audacieuse recherche ! Il s'agit de transformer ce qui était un art d'ingénieur, la formulation des produits industriels, en une science.

Le travail est complémentaire de celui qui se fait dans l'unité mixte du CEA et de Rhône-Poulenc, à Aubervilliers, où Bernard Cabane et ses collègues étudient les systèmes dispersés : suspensions, émulsions, colloïdes. Le point commun ? Les molécules tensioactives, qui ont une partie soluble dans l'eau (hydrophile) et une partie insoluble (hydrophobe). Selon leur concentration, ces molécules forment des microstructures variées, telles des couches, en surface, ou bien des micelles, sorte de sphères où les têtes hydrophiles sont au contact de l'eau, tandis que les queues hydrophobes se regroupent, au centre.

Dans les produits cosmétiques ou agroalimentaires, dans les encres et dans les lessives, les tensioactifs interagissent souvent avec des polymères employés comme émulsifiants, stabilisants, épaississants...



Neurones colonisés par des adénovirus génétiquement modifiés.

Dans les shampoings, par exemple, les tensioactifs sont combinés avec des polymères : les premiers détachent les salissures grasses pour les disperser dans l'eau de lavage, tandis que les seconds modifient la surface des cheveux et améliorent le coiffage. Pour optimiser ces propriétés et pour réduire les concentrations en tensioactifs (l'environnement est un souci constant !), les chercheurs étudient des molécules tensioactives d'une nouvelle génération, en forme de peignes à trois ou quatre dents : quand le manche est hydrophile et les dents hydrophobes, ces molécules s'assemblent en structures en forme de vers, qui conservent leurs propriétés quand leur concentration est divisée par dix. Combien de dents réunir ? Sur des manches de quels types ?

LA BIOLOGIE DES PLANTES

Selon les cas, selon les équipes, selon les affinités, selon les compétences, les unités mixtes peuvent être de grosses ou de petites équipes. Le Laboratoire de physiologie cellulaire végétale, dirigé par Roland Douce, au Centre de recherche agrochimiques de La Dargoire, à Lyon, est un exemple de petite structure mobile et active. Composée d'une dizaine de chercheurs, elle étudie les caractéristiques biochimiques d'enzymes importantes du métabolisme de la cellule végétale : synthèse des acides aminés essentiels et des vitamines, et cibles potentielles d'herbicides.

Obtenue grâce aux outils les plus puissants de la biochimie, de la biologie moléculaire et de la physique, la connaissance précise de la structure tridimen-

sionnelle des enzymes permettra de créer de nouvelles molécules qui interagiront avec les sites actifs de ces enzymes et se comporteront comme des herbicides efficaces, sans risques pour les hommes et pour les animaux. Le laboratoire étudie également les toutes premières étapes de la germination des graines, afin d'améliorer leurs qualités germinatives et d'homogénéiser les lots de semence (équipe de Dominique Job).

LE SYSTÈME NERVEUX

Le Laboratoire Système nerveux et régulation génétique, à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière de Paris, est beaucoup plus gros (il comporte quelque 40 chercheurs) ; il est aussi très pluridisciplinaire, puisqu'il mêle à la fois des médecins, des neurobiologistes et des chercheurs du Groupe Rhône-Poulenc.

Cette équipe, dirigée par Jacques Mallet, étudie la régulation de gènes de synthèse des neuromédiateurs, ces molécules qui, libérées par les cellules nommées neurones, transmettent l'influx nerveux dans le cerveau. L'un de ces neuromédiateurs, la dopamine, disparaît lors de la dégénérescence des neurones qui constitue la maladie de Parkinson. Peut-on traiter les malades contre la raréfaction de la dopamine ? Daniel Scherman et ses collègues de l'unité mixte installée dans le Centre de recherches de Vitry-Alfortville étudient des méthodes de transfert de gènes à l'aide de vecteurs non viraux. L'équipe de la Pitié teste des méthodes complémentaires de thérapie génique : l'utilisation de virus rendus inoffensifs pour introduire des gènes thérapeutiques dans les cellules nerveuses.

Et c'est ainsi qu'ils ont montré, par des études sur des rats, que les adénovirus peuvent être des vecteurs de gènes dans les cellules gliales et dans les neurones, quand ils sont injectés directement dans le cerveau. Par exemple, les neurobiologistes ont réussi à faire produire le GDNF par les neurones infectés par les adénovirus : ce dernier compense la perte en dopamine en faisant produire le neuromédiateur, et il prévient la dégénérescence.

Le laboratoire se développe aujourd'hui avec des études des maladies mentales, dont il recherche des gènes caractéristiques en se fondant sur la de cartographie du génome humain. Preuve que du fondamental à l'appliqué, il y a sans doute moins qu'on ne le croyait naguère. ■



Céramiques sur orbite

Le laboratoire mixte CNRS-sep, à Bordeaux, met au point des matériaux composites originaux.

Quel matériau utiliser pour réaliser les tuyères de fusées, portées à des températures atteignant 3 000 degrés ? Les métaux fondent à ces températures, et ils ont l'inconvénient d'être lourds. Seuls résistent les céramiques, les graphites et les composites carbone-carbone, que l'on obtient en faisant passer du méthane entre des fibres de carbone, dans un four : la décomposition du gaz, dans les porosités, dépose du carbone qui forme une matrice où sont alors noyées les fibres.

La Société Européenne de Propulsion (sep) étudiait ces questions depuis longtemps, souvent en collaboration avec des équipes du CNRS. Toutefois la découverte fortuite de céramiques d'un type nouveau bouleversa tant le secteur des matériaux, qu'il fallut renforcer ces collaborations. C'est ainsi qu'est née l'Unité mixte de Bordeaux.

L'idée fondatrice date de plus de 20 ans : des ingénieurs de la sep et le Laboratoire CNRS de chimie du solide, à Bordeaux, proposèrent d'améliorer les composites carbone-carbone en y introduisant des céramiques. Le remplacement du méthane par un gaz plus complexe, contenant du silicium, permit de déposer du carbure de silicium... et d'observer un comportement mécanique étrange : les nouveaux composites ne cassaient pas net et se fissuraient sans casser. Le concept de composites à matrice céramique fut breveté.

À cette époque, un industriel japonais présenta une nouvelle fibre de carbure de silicium, la *Nicalon*, assez fine pour être mise en forme facilement. Aussitôt, les chimistes de Bordeaux et les ingénieurs de la sep réalisèrent des céramiques de carbure de silicium dans une matrice de carbure de silicium. Alors que les céramiques sont réputées pour leur quasi-indéformabilité, les ingénieurs et chercheurs bordelais mesurèrent des déformations atteignant un pour cent ! La nouvelle famille de céramiques avait une tenue mécanique tout à fait remarquable et imprévue.

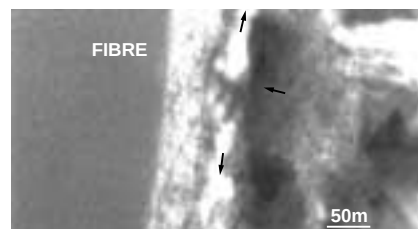
Que faire d'un tel matériau ? *Snecma*, maison mère de la sep, imagina de les employer pour les volets de sortie des moteurs M88 du *Rafale*. Puis, pour le programme *Hermès* d'avion spatial, les ingénieurs de la Société Dassault avaient besoin de protections thermiques, galbées, durables, minces. La sep proposa les composites céramique-céramique, de sorte que, quand on refit l'avant-projet avec ces nouveaux matériaux, la masse de l'engin avait diminué de 15 pour cent ; les épaisseurs étaient réduites, et les formes étaient affinées. Le programme *Hermès* accéléra la mise au point du matériau : moins de dix ans s'écoulèrent entre le premier centimètre cube obtenu en laboratoire et la première grande pièce produite dans des conditions industrielles.

La sep paria sur l'avenir industriel du matériau sur le marché mondial et confia aux équipes de Bordeaux la mission de conforter les bases scientifiques, afin de faciliter la production. C'est alors que la direction générale de la sep rencontra le CNRS, afin de proposer une collaboration à long terme. Le concept d'unité mixte de recherche, juste sorti de la fonderie administrative, convenait parfaitement. Le laboratoire fut fondé, et Roger Naslain et Pierre Lamicq, directeur de la recherche de la sep, furent chargés de préparer un démarrage en septembre 1987. Nous fêtons l'anniversaire de cette création.

HARMONIE ET TRAVAIL

Après ses débuts enthousiastes, le laboratoire de Bordeaux rencontra des conditions difficiles : une des propriétés espérées des composites céramique-céramique, la longévité, se révéla moins satisfaisante qu'on l'avait espéré. En outre, le programme *Hermès* fut arrêté, supprimant l'utilisation la plus prestigieuse.

En revanche, on découvrit que les composites carbone-carbone, que l'on utilisait classiquement dans les moteurs fusées et les freins d'avion, avaient de nouveaux atouts, principalement pour les



La déviation des fissures le long des fibres d'un composite céramique-céramique (en haut) multiplie les obstacles et défragilise le matériau (en bas).

freins de trains ou d'automobiles. Cependant ils devaient être améliorés. Pourrait-on les pousser à des limites inégalées ?

Les méthodes d'observation et d'essais mises au point pour les composites céramique-céramique s'appliquaient : elles furent immédiatement adaptées. La recherche obtint des résultats importants ; le laboratoire mixte se reconvertit partiellement sur les composites carbone-carbone. Avec ses 45 chercheurs, dont 15 permanents du CNRS, de l'Université de Bordeaux I et de la sep, le laboratoire mixte CNRS-sep poursuit ces études. La mission est claire : il s'agit de créer et de comprendre des matériaux composites à base de carbone et de céramiques résistant bien à la chaleur.

Plusieurs dispositions assurent le transfert continu des connaissances (d'abord à la sep) : chaque thèse est suivie par un ingénieur, et les travaux sont périodiquement discutés. Comme le développement des composites serait ralenti par la mise sous cloche des équipes de recherche, P. Lamicq et R. Naslain se sont accordés sur une politique très ouverte, avec une large publication des résultats, l'invitation de chercheurs étrangers, qui apportent de nouvelles stimulations. Cette attitude ouverte donne confiance aux hommes du laboratoire et se révèle positive pour la sep, au total. Tout le système est fondé sur la réactivité de la structure. ■

De la structure imaginée au produit industriel

La compréhension de mécanismes universels à partir d'un problème posé par l'industrie ouvre la voie aux perfectionnements.

Les acteurs de la recherche scientifique et industrielle renouent le dialogue entre Aristote et Platon. Faut-il, comme le chercheur aristotélicien, rechercher la nouveauté dans l'observation de formations naturelles? Doit-on se fonder, s'interroge le chercheur platonicien, sur les conceptions idéales qu'élabore notre cerveau, pour imaginer des structures novatrices? Pour ce qui est des matières plastiques, les inventions résultent plus aujourd'hui des réflexions platoniciennes. La demande industrielle est aristotélicienne : elle est fondée sur les propriétés souhaitées de la matière. La conception, dans l'Unité mixte CNRS-Elf Atochem, est d'essence platonicienne.

Après tout, les matières plastiques modernes, inspirées de la nature, ont été confectionnées par l'homme ; depuis la découverte de la première matière plastique entièrement synthétique, la bakélite, par Baekeland en 1910, les nouveaux produits plastiques ont été le fruit de l'imagination humaine.

Ce succès se prolonge aujourd'hui, à la fois dans les quantités de matière

produites et dans les types de structures élaborées. À ces deux points de vue, les polymères sont un secteur porteur de l'industrie, où la Société Elf Atochem est un des principaux acteurs mondiaux. Elf Atochem est le premier fabricant européen de polymères, le quatrième producteur de substances adhésives polymériques.

Dans cette discipline, les chercheurs français ont joué et jouent encore un rôle de tout premier plan ; la tradition s'est perpétuée, des initiateurs de la chimie et de la physico-chimie des polymères, aux travaux de Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique en 1991, sur la compréhension fine des enchevêtrements polymériques.

Car les vœux des industriels ne sont pas tous exaucés, les limites possibles ne sont pas toutes atteintes : l'industrie recherche des polymères tenant à de plus hautes températures, des gels plus absorbants, des fibres mécaniques entièrement cristallisées ayant les propriétés de l'acier pour une densité bien inférieure, des papiers plus résistants, des colles plus efficaces.

L'Unité de recherche CNRS-Elf Atochem, dirigée par Ludwik Leibler, poursuit les recherches sur les polymères en modélisant des ordonnancements structuraux hétérogènes. La compréhension fine de l'organisation macromoléculaire permet d'aller plus loin dans la spécification des propriétés et les qualités des structures. En parallèle, les recherches effectuées expliquent la physique des phénomènes observés et ouvrent la voie aux perfectionnements.

L'ORGANISATION DES COPOLYMÈRES

On sait depuis plusieurs siècles que les alliages métalliques sont des mélanges hétérogènes où l'on spécifie à façon des qualités requises. Les mélanges de polymères sont adaptés dans un même esprit, mais offrent plus de diversité, car on y contrôle à la fois les monomères constitutifs, leur répartition dans la chaîne et la longueur des chaînes polymériques.

L'agitation thermique tend à mélanger les polymères, mais les forces d'interaction chimiques peuvent favoriser la ségrégation. Dans le cas de deux polymères A et B dont les propriétés chimiques des monomères constitutifs sont différentes, la température de transition entre mélange homogène et phases séparées est d'autant plus élevée que les chaînes polymériques sont longues.

Les architectures sont plus facilement ajustées avec des copolymères où les chaînes polymériques sont constituées de deux ou trois types de polymères de natures différentes soudés par des liaisons chimiques. Les structures macroscopiques dépendent de la taille et de la flexibilité des chaînes polymériques. Depuis une vingtaine d'années, on observe, grâce aux moyens d'analyse perfectionnés, des configurations de copolymères en lamelles, en cylindres ou en sphères.

Un enjeu toujours d'actualité est de trouver des applications des matériaux ayant ces structurations originales.

