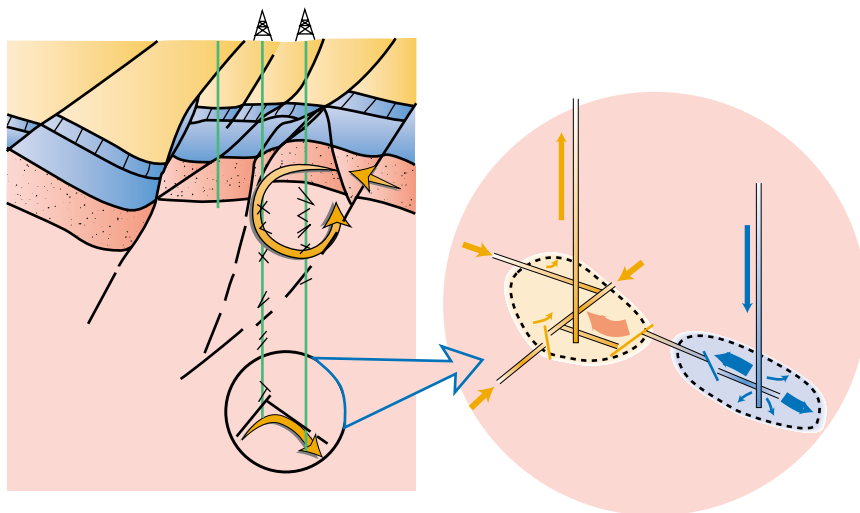




Dispositif géothermique profond de Soultz-sous-Forêts. Dans la partie sédimentaire, les structures sont bien connues du fait d'un grand nombre de puits pétroliers et de profils de géophysique. Dans le granite, seuls les forages indiquent la localisation des grandes failles. Au cœur de ces zones, des 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 directoire 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, notamment, 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. ■

