

Missions du D R F M C

Jacques CHAPPERT

Mai 2010

La mission principale du **D**épartement, et sa raison d'être, est d'effectuer des travaux de **R**echerche **F**ondamentale dans le domaine de la **M**atière **C**ondensée. Il s'agit de cet état de la matière suffisamment dense (solide, liquide ou gazeux), pour que les atomes constitutifs puissent interagir fortement entre eux. Apparaissent alors des phénomènes collectifs, se traduisant par des propriétés macroscopiques intéressantes, d'origine mécanique, électrique, magnétique, optique, chimique, biochimique, etc. Ces recherches concernent essentiellement des disciplines comme la physique et la chimie, mais elles ont aussi de fortes implications en biologie.

Ces études s'effectuent sur des matériaux que les chercheurs synthétisent le plus souvent eux-mêmes, et ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord il ne faut pas que leurs propriétés soient parasitées ou modifiées par des impuretés ou des mélanges non contrôlés de plusieurs matériaux. Ensuite, même sans impureté, ces matériaux sont parfois trop complexes à étudier dans leur globalité. On cherche donc à sérier les problèmes en synthétisant d'abord des systèmes « modèles », que l'on maîtrise parfaitement, pour se rapprocher progressivement du système réel, et comprendre ainsi son comportement. Enfin, dans leur quête de propriétés nouvelles, les chercheurs en arrivent à imaginer de nouveaux systèmes qui n'existent pas dans la nature, mais dont ils subodorent qu'ils pourraient posséder des propriétés inédites. Il va sans dire que cette tâche est particulièrement ardue et nécessite une haute technicité et des outils d'élaboration conséquents. La compréhension de ces systèmes nécessite aussi de développer des concepts théoriques nouveaux et notamment des méthodes statistiques du fait du grand nombre d'atomes en interaction.

Il faut mentionner qu'une des forces du DRF réside dans une forte interpénétration des équipes, ce qui aboutit à une pluridisciplinarité des plus fructueuses. C'est ainsi le cas de plusieurs études impliquant une collaboration étroite entre physiciens et chimistes. De même, bien que les laboratoires de biologie ne fassent plus partie du DRF depuis 1990, il a subsisté de solides affinités entre les équipes et bien des thèmes de recherche n'auraient jamais vu le jour sans cette osmose initiale. On la sent encore dans plusieurs thèmes où des interactions existent toujours avec les biologistes de DSV.

Outre la mission principale du Département, la recherche fondamentale, on doit noter deux autres missions importantes, que j'ai toujours voulu maintenir et même approfondir :

- la formation par la recherche de nombreux jeunes par le biais des thèses
- la valorisation les résultats des recherches, chaque fois que cela était possible, soit avec des autres unités du CEA, soit avec des entreprises extérieures.

Mentionnons enfin le grand nombre de collaborations avec des équipes extérieures, tant au niveau national qu'international. Ceci est une source d'enrichissement permanente.

Principaux axes de recherche, faits marquants et acteurs

physique des matériaux, microstructures, nanostructures

Les premières études de matériaux menées au début du CENG, à l'initiative de **Louis Néel** et **Daniel Dautreppe**, étaient directement liées au nucléaire puisqu'elles avaient pour but de comprendre les défauts dans les métaux créés par irradiation (**Jean Paulevé**, **Pierre Peretto**) et notamment le gonflement provoqué par les neutrons dans les aciers, entraînant la fragilisation des cuves des réacteurs nucléaires. D'où la nécessité de disposer de métaux de départ très purs, tels le fer (**Pierre Moser**), et de savoir les doper de façon contrôlée.

Ensuite l'évolution majeure des programmes du DRF en physique des matériaux a résulté du développement extraordinaire de la technique de microscopie électronique à haute résolution, initialisé par **Alain Bourret**. Celui-ci, en collaboration notamment avec **Jany Thibault**, devait pousser cette technique à un très haut degré de sophistication et créer une des meilleures écoles dans le cadre d'un pool de microscopie électronique regroupant métallurgistes, physico-chimistes, biologistes... Des résolutions d'une fraction de nanomètre, inférieure à la distance inter-atomique, ont été atteintes, produisant des images permettant la visualisation individuelle des atomes et fournissant ainsi des informations structurales et chimiques importantes.

C'est **Max Verdone** qui fut un pionnier de l'étude physique de base des semi-conducteurs au DRF et qui a ensuite ouvert la voie à un fabuleux développement de ces matériaux dans le cadre du LETI. Ces recherches ont aussi pris, dans les années 80, une ampleur importante grâce à une technique d'élaboration développée au DRF, dans le cadre d'une équipe mixte CEA-CNRS : l'épîtaxie par jets moléculaires (EJM). Ainsi des microstructures semi-conductrices (puits quantiques, super réseaux) (**Jean-Louis Pautrat**, **Noël Magnéa**, **Engin Molva**) sont utilisées pour des dispositifs dans l'infrarouge et le visible.

Mais des multicouches métalliques (empilements de matériaux magnétiques et non magnétiques) (**André Chambérod**) peuvent également être réalisées par la même technique d'épîtaxie. Ces couches alternées se révèlent intéressantes, car elles présentent des propriétés de magnéto-résistance élevées, utiles pour l'enregistrement magnétique. Sont également étudiés des systèmes intermédiaires, tels que des jonctions magnétiques métal-isolant, qui ont aussi une magnéto-résistance remarquable (**Bernard Diény**). L'ensemble de ces recherches a conduit au fulgurant développement des nanotechnologies (Minatec) et encore récemment à la création de nouvelles entités : Plato, Spintec, SiNaps...

Mentionnons enfin les récentes possibilités qu'a apportées l'utilisation par les chercheurs en matériaux du rayonnement synchrotron de l'ESRF (à l'initiative de **Alain Bourret** et **Michel Béalakhovsky**). Les rayons X, mis en oeuvre dans des dispositifs extrêmement variés, peuvent révéler en effet la structure intime des interfaces métal-céramique ou permettre d'obtenir des images de surfaces à l'échelle microscopique (**Gilles Renaud**).

Parallèlement aux études de matériaux bidimensionnels (plan) ou même unidimensionnels (fils ou chaînes), des micro-particules, les agrégats, constitués seulement de quelques dizaines ou quelques centaines d'atomes, ont fait l'objet d'études approfondies. Ils sont intéressants parce qu'ils constituent une étape intermédiaire entre l'atome individuel et le solide massif. A partir de quel nombre d'atomes, le solide existe-t-il ? Pour le savoir, les chercheurs du DRF (**Claude Guet**) ont construit un appareillage spécifique extrêmement ingénieux qui permet de bombarder les agrégats métalliques avec un faisceau d'ions multichargés positivement, et qui agit comme une pompe à électrons sur les agrégats. Ils mettent ainsi en évidence l'importance de la structure électronique du métal de l'agrégat. Les

électrons jouent en quelque sorte le rôle de « colle » pour stabiliser l'agrégat. Si l'on « pompe » les électrons, l'agrégat explose.

magnétisme

Le magnétisme ne pouvait être qu'un thème de recherche majeur au CENG étant donné l'impulsion première donnée par **Louis Néel**. La construction à Grenoble d'un réacteur (Mélusine) est d'ailleurs à l'origine même de la création du Centre. Les flux de neutrons se prêtaient particulièrement bien à l'étude des structures magnétiques et c'est ainsi que **Erwin-Félix Bertaut** fut chargé par Néel de monter un laboratoire de Diffraction Neutronique. Grâce à son énergie et son intuition, ce laboratoire a rapidement acquis une réputation internationale en conjuguant les efforts dans deux directions. D'une part l'élaboration de monocristaux de composés magnétiques originaux de grande qualité, d'autre part la mise au point d'une instrumentation de diffraction neutronique extrêmement performante. A l'arrêt de Siloë, les chercheurs du DRF ont transféré leurs appareils à l'ILL et ont fait ainsi profiter la communauté internationale de leur immense know-how. A ces moyens, se sont par la suite jointes des techniques d'étude du magnétisme plus microscopiques comme la spectroscopie Mössbauer, sous champ magnétique intense notamment au SNCI et la spectroscopie de muons (**Jacques Chappert, Marc Bogé, Jean Pierre Sanchez, Alain Yaouanc**), dans le cadre d'une collaboration internationale au CERN pour cette dernière.

Le thème majeur de toutes ces recherches est l'élucidation des structures magnétiques, c.à.d. la configuration des moments magnétiques (les « spins »), principalement dans les composés de métal de transition, de terre rare ou d'actinide. La connaissance des structures est nécessaire pour interpréter les propriétés magnétiques (**Georges Roult, Alain Delapalme, Jacques Schweizer, Jean Rossat-Mignod, Jean Xavier Boucherle, Louis Pierre Regnaud**, et bien d'autres). L'élucidation des structures a été, et est encore, soutenue par une approche théorique originale, toujours connue sous le nom de « méthode Bertaut ». Ceci a très souvent fait l'objet de multiples collaborations internationales, grâce à la présence permanente dans le laboratoire de diffraction neutronique de visiteurs ou thésards étrangers que Bertaut savait si bien attirer à Grenoble.

Un autre sujet d'étude, qui a suscité une grande effervescence dans toute la communauté scientifique il y a environ 20 ans (déjà...), concerne les supraconducteurs à haute température critique. Les chercheurs du DRF (**Jean Rossat Mignod, Jacques Flouquet**) ont été, et sont toujours, des acteurs très présents dans cette « saga » à rebondissements. Ils ont, dès le début, voulu comprendre l'origine de cette supraconductivité inédite, le mécanisme par lequel elle prend naissance dans ces systèmes à caractère bidimensionnel et son lien, s'il y en a un, avec le magnétisme. Les résultats expérimentaux sont nombreux, mais on est toujours à la recherche d'une explication de la supraconductivité acceptée par tous. En liaison avec ces recherches, mentionnons aussi les études sur des propriétés dynamiques des systèmes unidimensionnels (chaînes magnétiques)

physico-chimie, chimie, biochimie

La proximité des physiciens, l'accès à de nombreuses techniques d'analyse performantes, la capacité de réaliser des synthèses chimiques originales, ont permis aux chimistes du DRF de réaliser des avancées significatives dans de nombreux domaines.

Un premier domaine d'excellence concerne les polymères conducteurs électroniques (**Maxime Nechtschein, Jean Pierre Travers**). Grâce à un dopage intrinsèque, certains polymères, comportant une structure en chaîne, acquièrent une conductivité importante, qui pose beaucoup de questions. Il est essentiel comme le font les chercheurs du DRF de tenter de

comprendre le mécanisme de cette conductivité (différente de celle du métal) et de pouvoir la contrôler. La légèreté, la facilité de mise en forme des films de tels matériaux (polyaniline par exemple) laisse augurer de nombreuses applications, déjà partiellement concrétisées: revêtement antistatique, furtivité radar, blindage électromagnétique, etc.

D'autres types de polymères, mais à caractère ionique, les ionomères (**Michel Pinéri**), forment des membranes, qui, là aussi, peuvent être à la base d'applications importantes et d'un grand avenir: piles à combustible (un sujet de plus en plus d'actualité), vitrage électrochrome, perméation gazeuse,...Là encore les applications sont conditionnées par une meilleure compréhension de la structure de ces matériaux et de la possibilité de contrôler toutes les étapes de leur élaboration.

La chimie de coordination est un domaine important de la chimie qui s'intéresse aux architectures moléculaires complexes obtenues par la combinaison de molécules organiques avec des atomes métalliques. Dans ces systèmes, l'architecture moléculaire est conçue de manière à permettre la mise en ordre des moments magnétiques du métal, se traduisant par l'apparition d'une aimantation spontanée (**Paul Rey**). Le but visé est d'arriver à la réalisation, bien qu'encore lointaine il est vrai (autour de 10K actuellement), d'aimants moléculaires à température ambiante. Les neutrons (**Jacques Schweizer, Jean Xavier Boucherle**), mais aussi bien d'autres techniques dont dispose le DRF (susceptibilité magnétique, résonance magnétique) permettent de mettre en évidence la répartition spatiale de l'aimantation dans ces ferro-aimants moléculaires et de comprendre le mécanisme du couplage magnétique.

Autre domaine d'un enjeu majeur pour le CEA, le problème du retraitement du combustible nucléaire et, plus généralement celui des déchets nucléaires. C'est dans ce contexte qu'a été abordée il y a une dizaine d'années la chimie des lanthanides et des actinides, notamment la séparation des actinides mineurs. Ainsi des études sont menées sur la complexation (**Jean Marc Latour**) afin de rechercher de nouveaux extractants sélectifs des actinides.

De la chimie à la biologie il n'y pas loin et les interactions entre ces deux disciplines sont nécessairement très fortes, se fécondant mutuellement. Un exemple concerne le mode de fonctionnement des métalloprotéines (**Bernard Lamotte**) responsables, par exemple, de la photosynthèse ou de la fixation de l'azote de l'air en le transformant en ammoniac. Ces protéines renferment un site spécifique, dit actif, contenant un métal (fer notamment). Les méthodes de résonance (RPE, RMN) sont des outils privilégiés pour élucider, d'abord dans des analogues synthétiques, puis dans les protéines elles-mêmes, les mécanismes de transfert d'électrons qui s'opèrent lors de leur mise en œuvre et qui constituent un processus important du monde vivant.

Le monde des médicaments est également un domaine de prédilection de la chimie. Il faut savoir que dans les organismes vivants existent des molécules dites chirales : elles peuvent posséder deux structures moléculaires, images l'une de l'autre dans un miroir. L'une ou l'autre forme existe dans l'organisme et il est nécessaire de synthétiser des médicaments dont les molécules soient adaptées à la forme existante, sinon on aboutit à des catastrophes (thalidomide). Des résultats prometteurs ont ainsi été obtenus au DRF sur les métallo-porphyrines (**Jean Claude Marchon**) grâce à la catalyse dite asymétrique, qui permet de sélectionner, de trier ces formes.

Quand les cellules vivantes sont soumises à l'action des rayonnements, des lésions apparaissent sur les acides nucléiques (gènes). L'identification de ces lésions est un enjeu capital. Afin d'y parvenir, il faut être capable, comme les chimistes du DRF (**Robert Téoule**) l'ont fait, de mettre en œuvre des méthodes de détection ultrasensibles pour détecter la présence d'un gène. Cette méthode est maintenant utilisée en milieu hospitalier. Egalement, un magnifique exploit a été réalisé en effectuant la première synthèse chimique totale d'un

acide ribonucléique de transfert (ARN), comprenant 76 nucléotides, ce qui représente autant d'étapes successives de synthèse à réussir.

Il est aussi primordial de comprendre comment ces liaisons se produisent. On étudie donc (**Jean Cadet**) les mécanismes de décompositions photochimiques et oxydantes de l'ADN qui peuvent être à l'origine de maladies, notamment des cancers. L'industrie cosmétique est aussi concernée (action des rayons ultra-violet). Une méthode très originale a été développée qui permet d'identifier la nature chimique des lésions apparaissant dans les cellules, la chromatographie liquide à une double spectrométrie de masse.

Enfin le « nanomonde » a aussi envahi la chimie et la biologie, avec l'apparition des biopuces ou puces à ADN, à la croisée de la chimie des surfaces, de la biologie, des microtechnologies et de la bio-informatique. Ce développement a pu se réaliser grâce au travail de pionnier des chercheurs du DRF (**Gérard Bidan**) sur la fixation des biomolécules par des méthodes électrochimiques sur des surfaces métallisées (procédé Micam)

instrumentation

Une instrumentation scientifique de pointe est un facteur essentiel de réussite des recherches. Ainsi l'étude des agrégats métallique mentionnée précédemment n'a pu être réalisée que grâce aux remarquables sources RCE (résonance cyclotronique électronique) inventées à Grenoble (**Richard Geller**). Ces sources sont maintenant utilisées dans de nombreux instituts de recherche dans le monde entier, tel le CERN à Genève, mais aussi dans des centres hospitaliers, comme au Japon et bien sûr au DRF (**Gérard Melin, Claude Guet**) sur l'AIM (accélérateur d'ions multichargés), maintenant transféré à Ganil. Une des dernières nées, la source supraconductrice SERCE, livrée à l'Institut de Catane, permet d'obtenir des faisceaux très intenses d'ions très chargés.

Nous avons aussi mentionné les installations de diffraction neutronique construites par les chercheurs du DRF d'abord à Mélusine puis à Siloë (**Georges Roult, Alain Delapalme, Jacques Schweizer, Jean Rossat-Mignod, Louis Pierre Regnault**), et qui profitent maintenant à l'ensemble de la communauté scientifique travaillant à l'ILL. Dans le même esprit, des dispositifs ingénieux ont été installés auprès des lignes de faisceaux de l'ESRF consacrées aux études de surfaces et d'interfaces (**Michel Bélakhovsky, Alain Bourret**).

De nombreuses techniques d'analyse ou de mesure ont été portées à un haut degré de sophistication : microscopie électronique (**Alain Bourret, Jany Thibault**), rayons X (**Jean Laugier**), résonances magnétiques (RMN et RPE pulsée), **Pierre Servoz-Gavin, Bernard Lamotte, Michel Bardet**), effet Mössbauer (**Jacques Chappert**), mesures thermiques, électriques, magnétométriques, techniques électrochimiques, irradiations variées, etc. De même toute recherche de pointe nécessite des matériaux uniques et parfaitement contrôlés. Ceci ne peut être obtenu que si l'on en maîtrise, comme au DRF, toutes les étapes : dépôts épitaxiaux (**Jean Louis Pautrat, Noël Magnéa**), cristallogénèse de monocristaux (**Jean Maréchal, George Buisson, Jean Yves Henry**), synthèse chimique (**tous les chimistes**).

S'il y a un domaine où le DRF joue un rôle particulièrement significatif et qui est reconnu nationalement et internationalement, c'est bien celui de l'instrumentation cryogénique. Les basses températures sont nécessaires dans la plupart des domaines de recherche. La réputation des chercheurs du DRF (**Gérard Claudet, Alain Ravex**) est bien établie en ce qui concerne le support en cryotechnologie, tant en physique légère (cryostats de laboratoires) que pour l'utilisation des grands instruments (accélérateurs de particule, réacteurs de fusion, champs magnétiques intenses, etc). Pour illustrer ceci mentionnons quelques réalisations qui ont été particulièrement fructueuses :

- la mise en oeuvre de l'hélium superfluide en convection forcée utilisée à Tore-Supra et prochainement sur l'accélérateur LHC du CERN.
- les réfrigérateurs autonomes pour le refroidissement de détecteurs dans l'espace.
- les injecteurs de glaçons de deutérium pour les réacteurs de fusion.
- un ensemble supraconducteur pour source d'ions pour un institut italien.
- la mise en place des cibles du futur laser Mégajoule prévu pour 2011.