

# Les aventuriers de la matière : le Laboratoire Léon Brillouin

## Le Laboratoire

## Léon Brillouin

### Mise en place et développement du parc expérimental

La structure créée par la convention CEA/CNRS du 2 février 1974 prend le nom de Laboratoire Léon Brillouin, ou LLB, du nom de l'un des grands pionniers de la physique des solides. Le jeune laboratoire est chargé d'une triple mission :

- concevoir avec Orphée une source de neutrons et des instruments appropriés aux études de la matière condensée ;
- préparer la mise à disposition de la communauté scientifique française et internationale de ces équipements ;
- développer un programme de recherches propre dans la continuité des expériences menées à Saclay depuis la fin des années 1950.

Le LLB capitalise en effet une expérience appréciable. Les premières diffusions de neutrons thermiques avaient été réalisées sur EL2 par le service de neutronique expérimentale, pour étudier les modérateurs et mesurer les sections efficaces des matériaux fissiles. En 1954, quelques chercheurs (dont B. Jacrot, F. Netter et M. Galula) décidaient d'appliquer la technique de la diffraction à la physique des solides cristallisés et de « bricoler » un spectromètre à temps de vol (voir p. 90) pour la diffusion inélastique de neutrons lents. L'expérience était

Expérimentations  
en cours dans le hall  
expérimental du  
réacteur Orphée.



### Léon Brillouin (1889-1969)

Léon Brillouin, héritier d'une grande lignée de scientifiques, est l'un des artisans de la révolution quantique en France. Après l'École Normale Supérieure, il poursuit sa formation dans l'équipe de Max Von Laue et Sommerfeld à l'Institut de Physique Théorique de Munich, où vient d'être réalisée la diffraction de rayons X par un cristal (voir p. 82). C'est là qu'il débute ses recherches sur la théorie des solides, alors balbutiante, qui seront consacrées par sa thèse de doctorat soutenue en 1920. Il s'attaque par la suite aux principaux problèmes de la mécanique quantique, notamment dans le domaine de la propagation des ondes, diffusant en France les travaux des physiciens anglo-saxons, enseignant à la Sorbonne, puis au Collège de France. En 1941, il quitte la France occupée pour les États-Unis, d'où il participe à l'effort de guerre contre l'Allemagne. Il terminera sa carrière à Harvard et à Columbia, en contribuant à l'essor d'une nouvelle discipline : la théorie de l'information.

couronnée de succès. Au même moment, la première conférence de Genève sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique relançait les échanges scientifiques internationaux et la spectrométrie neutronique accédait à la pleine lumière. Une équipe spécialisée dans l'utilisation de la diffusion se constituait à Saclay autour d'André Herpin ; elle sera par la suite rattachée au Service de physique du solide et de résonance magnétique d'Anatole Abragam.

Les premières études devaient porter sur les structures magnétiques de solides cristallins (le premier fut le YIG en 1954) – Anatole Abragam fera d'ailleurs appel à cette technique pour ses travaux sur le magnétisme nucléaire. Mais c'est la construction d'EL3 qui fournira l'occasion du développement décisif des méthodes et des instruments, grâce notamment à l'installation d'une source froide sur le nouveau réacteur. La physique des solides prenant une importance croissante en France, avec des enjeux scientifiques et institutionnels particulièrement vifs, les programmes de recherches bénéficient d'investissements substantiels. Le nombre d'instruments se multiplie. Le premier appareil

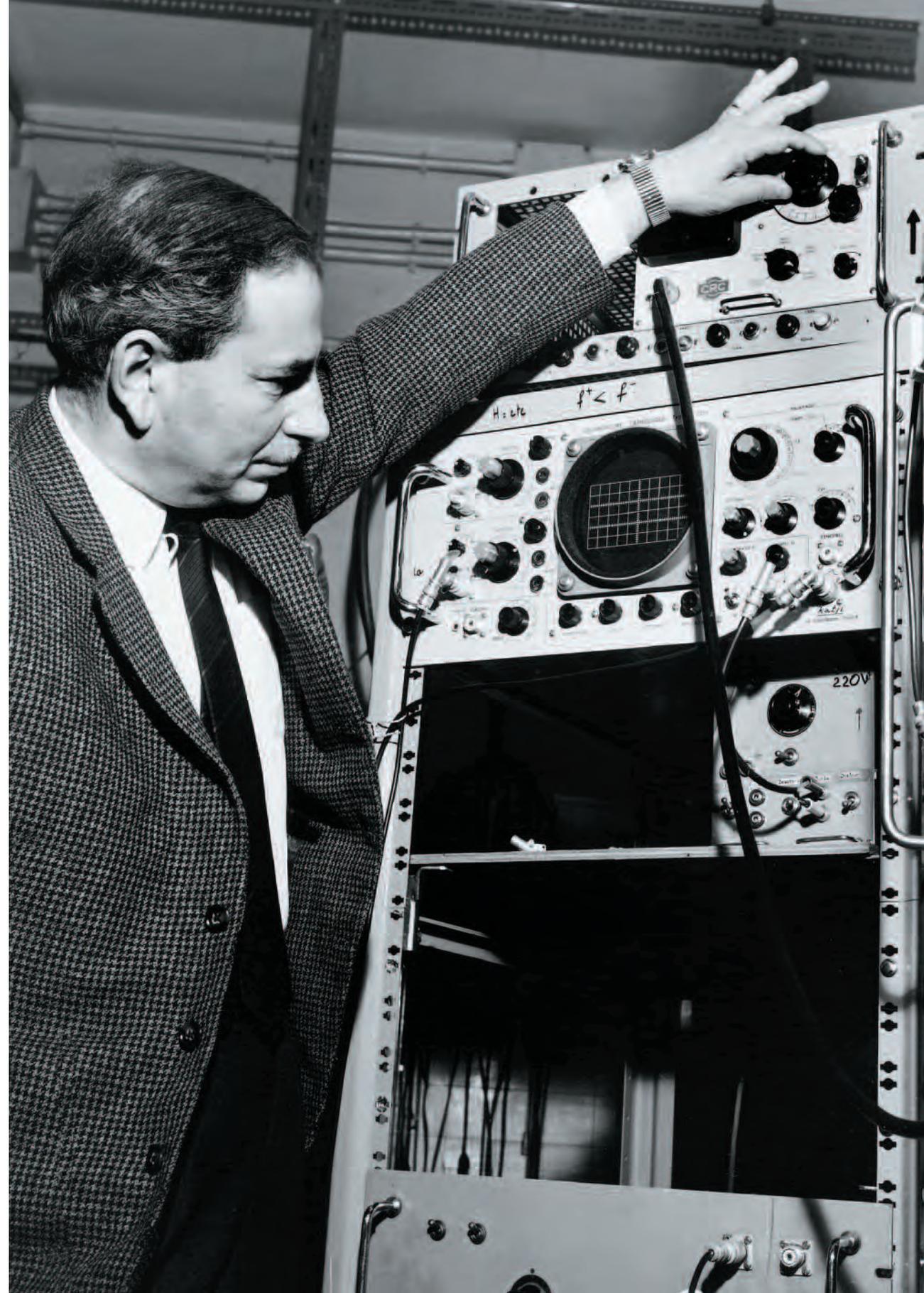


1. La gourde à hydrogène de la source froide d'EL3, qui alimentera les premiers guides à neutrons de Saclay.

2. Né en Russie en 1914, Anatole Abragam rejoint le CEA en 1947.

Il y gagne une renommée scientifique internationale, en élaborant une théorie de la structure hyperfine (1949) puis en se consacrant à l'étude du magnétisme nucléaire dans la matière condensée.

2





## LES DÉBUTS DE LA SPECTROSCOPIE NEUTRONIQUE

Les principes de la diffraction d'un faisceau de neutrons par une poudre ont été définis pour la première fois en mars 1936 par le physicien d'origine allemande Walter M. Elsasser. Trois mois plus tard, Hans Halban et Pierre Preiswerk en proposaient la première réalisation expérimentale grâce à l'utilisation d'une source radium-beryllium. Dana P. Mitchell et Philip N. Powers la confirmaient peu de temps après sur un cristal, en réussissant par surcroît à mesurer indépendamment les rayons diffractés. C'est après la mise au point des premiers réacteurs nucléaires aux États-Unis que la technique va réellement prendre son essor. Après les expériences réussies par Ernest Wollan, Clifford G. Shull et leur équipe avec un spectromètre à 2 axes installé sur la pile Clinton à Oak Ridge, la communauté scientifique découvre l'immense intérêt des neutrons thermiques. À l'orée des années 1950 leur utilisation s'étend aux structures magnétiques, puis Bertram Neville Brockhouse (prix Nobel de Physique 1994 avec Clifford G. Shull) établit à Oak Ridge les bases de l'étude de la diffusion inélastique, en concevant notamment le premier spectromètre à 3 axes (1954-1956). La spectroscopie neutronique s'érige peu à peu en discipline scientifique à part entière, et l'équipe de Saclay (Bernard Jacrot, Daniel Cribier) lui apporte une contribution importante par l'utilisation des neutrons froids. En 1960, date de la première conférence internationale sur la diffusion inélastique de neutrons, on compte 40 laboratoires dans le monde utilisant cette technique.

## DANIEL CRIBIER, PREMIER DIRECTEUR DU LLB

Après des études de physique à la Sorbonne, Daniel Cribier prépare au Collège de France une thèse sur la diffusion des rayons X dans la fluorine. Il entre en 1958 au CEA, où il rejoint le Service de physique du solide et de résonance magnétique d'Anatole Abragam. Il collabore à la conception et à l'exploitation des faisceaux sortis de neutrons sur EL3 (notamment à la mise en service de la source froide), avant de prendre la responsabilité des services de physique générale. Il contribue alors activement à l'ouverture du CEA sur l'extérieur, en diffusant les travaux auprès du reste de la communauté scientifique française (Université, CNRS) et en participant à la mise en place de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble. Partisan du maintien d'une source nationale de neutrons thermiques en région parisienne, il pilote le projet de réacteur EL3' (futur Orphée) et guide les premiers pas du LLB. Daniel Cribier quittera définitivement Orphée et le LLB en 1982, pour prendre la tête de l'Institut de Recherche Fondamentale (IRF) du CEA. Il sera par la suite membre du comité consultatif du Programme de fusion européen, ainsi que conseiller auprès de l'administrateur général du CEA et du directeur général du CNRS pour les grands équipements scientifiques.



à trois axes, permettant l'étude de la diffusion inélastique (voir p. 90), est installé à Saclay en 1965 par Daniel Cribier, futur fondateur du LLB, tandis que les guides de neutrons font leur apparition en 1967. Ce sont au total quinze spectromètres qui sont en service sur les faisceaux sortis d'EL3 en 1975.

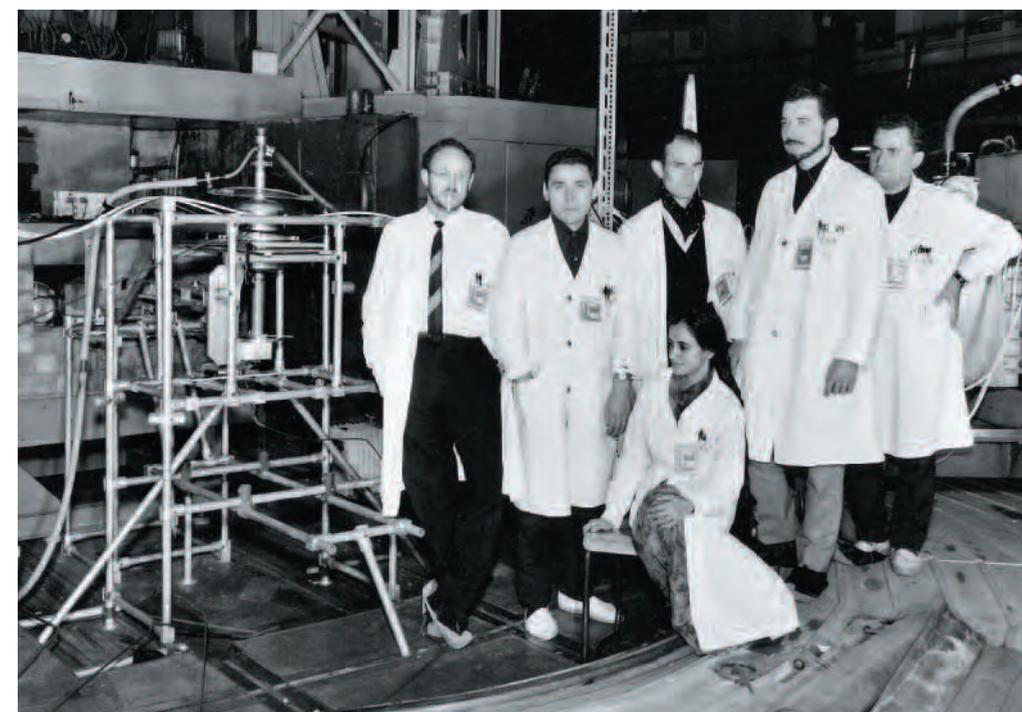
Les premières années du Laboratoire voient la poursuite des chantiers expérimentaux en cours, dans l'attente de l'arrêt programmé d'EL3 – la période de transition devant être mise à profit pour les analyses et les publications. Les principales recherches portent alors sur le magnétisme (détermination des structures magnétiques, recherche des phases ferromagnétiques, supraconducteurs), les structures cristallines et les polymères, l'analyse des phonons (voir p. 92), des

mouvements moléculaires et des transitions. En parallèle, on élabore soigneusement le dispositif expérimental dont sera doté le nouveau réacteur.

À l'entrée en fonctionnement d'Orphée, en 1983, la mise en place de la première génération de spectromètres est achevée. « Le LLB devait éviter un double écueil », soulignent les directeurs de l'époque, Marianne Lambert et Gérard Jannink : « soit ne s'occuper que d'instrumentation, soit s'enfoncer dans son propre domaine de recherche ». Les responsables choisissent de réutiliser en priorité les spectromètres d'EL3, en les adaptant et en les améliorant, et de construire les nouveaux appareils en coopération avec des partenaires européens. Certains demeureront ainsi la propriété des laboratoires associés, le LLB assurant le gîte et la gestion : l'appareil à temps de vol « Mibemol », construit par les Belges du centre nucléaire de Mol, un 4 cercles et deux 3 axes fournis par le centre allemand de Karlsruhe et par l'Université de Vienne, en Autriche, ainsi qu'un spectromètre conçu postérieurement pour étudier l'ordre

Une équipe de chercheurs à EL3 en 1967. Au premier plan : Usha Deniz. Derrière, de gauche à droite :

Daniel Cribier (futur directeur du LLB), Daniel Mons, Jean-Paul Trotin, Jean Mons et Alfred Bousquet.





Montage du Hall des guides.

### Les techniques expérimentales utilisées au LLB

Mesure souhaitée	Technique utilisée	Spectromètres disponibles au LLB
Étude de la structure atomique d'un échantillon de poudre	Spectromètres de diffraction de poudres (2-axes)	3T2, G4.1, G6.1
Étude de la texture et des contraintes des matériaux	Spectromètres de type poudres (2-axes) et monocristaux (4 cercles)	6T1, G5.2
Étude de l'organisation des atomes dans les liquides et amorphes	Spectromètres de type poudres (2-axes)	7C2
Étude de la structure atomique d'un échantillon monocristallin	Spectromètres de diffraction sur monocristaux (4 cercles)	5C1, 5C2, 6T2
Étude de la conformation des grosses molécules et de leur assemblage	Spectromètres de diffusion aux petits angles	Paxy, Paxe, Pace, Papyrus, TPA
Étude de la dynamique des atomes d'un échantillon monocristallin	Spectromètres de diffusion inélastique (3-axes)	1T, 2T, 4F1, 4F2, G4.3
Étude de la dynamique des molécules	Spectromètres de diffusion quasi élastique (Temps de vol, Écho de spin)	Mibémol, Muses
Étude du magnétisme des atomes	Tous les types de spectromètres	



Marianne Lambert (CNRS), auparavant directrice adjointe, succède à Daniel Cribier à la tête du LLB en 1982.

local dans les alliages métalliques, fruit d'une collaboration entre l'Onera et le CEA de Fontenay-aux-Roses. Les 18 premiers appareils proposent en définitive une gamme variée de dispositifs classiques (diffraction de poudres, diffusion diffuse, diffusion inélastique, diffusion aux petits angles), complétés par deux appareils spécialisés destinés à l'étude du pseudomagnétisme et de l'antiferromagnétisme nucléaires. Ce potentiel s'accroît rapidement dans le courant des années 1980, afin de répondre à une demande en forte croissance et de satisfaire à des exigences de plus en plus spécifiques. Un programme d'équipement en neutrons polarisés est lancé en 1985 en partenariat avec l'ILL, au terme duquel plusieurs spectromètres sont dotés de dispositifs polarisants amovibles. On développe par ailleurs les techniques de pointe, comme la spectrométrie à écho de spin (appareil Mess, puis Muses), l'étude des interfaces par réflectométrie (Éros) ou la diffusion aux petits angles (de 1 à 4 appareils), tandis que les progrès de la microinformatique et de l'électronique permettent des mesures beaucoup plus fiables



Le réflectomètre Désir sert de prototype à la construction d'Éros.

### Un OVNI à Saclay

« Pour le jeune chercheur que j'étais alors, comparés aux autres laboratoires purement CEA, le LLB semblait être un OVNI à Saclay. Des agents non CEA qui ont les mêmes attributions que les agents CEA ! Il fallait mener une lutte de tous les instants avec l'administration pour faire appliquer cette règle. Par ailleurs, notre budget, donné chaque année par un conseil d'administration, et non par le niveau hiérarchique supérieur (à l'époque l'Institut de Recherche Fondamentale, IRF) nous garantissait un financement stable qu'on nous envoyait. Héritage du CNRS, les chercheurs du LLB se sentaient très libres et n'hésitaient pas à interpeller directement le directeur du laboratoire, parfois même le chef de l'IRF. Par le CNRS, nous pouvions échapper à certaines contraintes du CEA, par exemple en matière d'équipement informatique. Il fallait également permettre un accès relativement aisé à nos nombreux visiteurs, notamment étrangers, venus utiliser nos appareils. Ce n'était pas toujours facile à mettre en œuvre. Avec le temps, le fossé qui nous séparait des autres laboratoires de Saclay diminuera progressivement. »

Alain Menelle,  
adjoint à la direction du LLB

Double page suivante :  
le hall des guides au début des années 1990.





## UN PLAT DE NOUILLES DE POLYMÈRES...

« [...] Vers les années 1975, une nouvelle opération de fédération fut réussie. Il existait à Strasbourg un centre de recherches macromoléculaires, dirigé à l'époque par Henri Benoît et comptant plus de cent chercheurs, l'un des bijoux du CNRS ; à Saclay, Gérard Jannink venait d'implanter un groupe utilisant des méthodes fines de diffusion des neutrons ; enfin, il y avait notre laboratoire de physique de la matière condensée [au Collège de France], petite mouche du coche théorique. Ce rassemblement triangulaire, parfois décrit par le sigle Strasacol, s'est avéré très profitable. Le centre de Strasbourg nous a fourni libéralement toute sa connaissance des systèmes de polymères et nous a expliqué les difficultés qu'ils soulevaient. Ensuite, nous nous sommes aperçus que l'outil neutron était extraordinaire pour élucider toute une série de problèmes qui avaient été mal résolus auparavant. En troisième lieu, notre «perlimpinpin» théorique a permis de dégager quelques principes et techniques simples, que l'on peut appliquer rapidement à n'importe quel

problème, au lieu d'affronter des faits sans ordre apparent. Les polymères fondus sont des chaînes flexibles qui font penser à un plat de nouilles enchevêtrées : si l'on tire brutalement avec une fourchette, on extrait du plat beaucoup de nouilles. De même, en tirant sur un polymère fondu, on entraîne beaucoup de chaînes et l'on constate une élasticité très bizarre qui régit toutes les fabrications de matières plastiques, pour lesquelles on utilise une extrudeuse à grande vitesse ou des moulages. Une contribution de notre groupe du Collège de France fut de comprendre le mécanisme en vertu duquel se font et se défont ces enchevêtrements ; je lui ai donné le nom de reptation, par analogie avec un petit serpent qui se faufile parmi d'autres serpents. Cette idée a aidé à éclairer cinquante ans de mesures en rhéologie des polymères. »

Pierre-Gilles de Gennes  
(Prix Nobel de Physique 1991),  
interview dans *Futura-Sciences.com*,  
21 juin 2002

et précises. Les recherches peuvent dès lors se diversifier, de la physique des solides à la physico-chimie et la biologie : étude des polymères, des microémulsions, des cristaux liquides... C'est en particulier à cette époque que la collaboration entre l'Institut Charles Sadron de Strasbourg, le Collège de France et le LLB assoit la réputation de Saclay dans l'étude de la matière molle.

Peu à peu, s'affirment les particularités du parc instrumental proposé par le LLB. L'ampleur des champs d'investigation couverts garantit la

richesse des échanges scientifiques et la haute technicité des expérimentateurs. L'ensemble du dispositif expérimental (guides à neutrons, monochromateurs, spectromètres, détecteurs) bénéficie d'une modernisation régulière, un soin tout particulier étant accordé au pilotage des appareils et au traitement des données. À côté des appareils « classiques », sont développés des outils étudiant les conditions extrêmes de température, de champ magnétique ou de pression. On retrouve ici les fortes préoccupations techniques et industrielles d'un laboratoire qui s'est



## La Société Française de Neutronique

La conjoncture nouvelle du milieu des années 1990 incite les utilisateurs français de neutrons à s'organiser afin d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles et défendre leurs pratiques scientifiques. Créée notamment sous l'impulsion de Jean Rossat-Mignot, alors directeur du LLB, en 1995, la Société Française de Neutronique se veut l'interlocuteur de la communauté scientifique française, tant auprès des organismes de tutelle et des instances de décision nationales, qu'auprès des partenaires internationaux. Elle s'affirme aussi comme un lieu de rencontre, d'échanges et de formation susceptible de stimuler le recours à la diffusion neutronique dans les recherches en physique, en chimie ou en biologie, ainsi que dans les applications industrielles. À cette fin, elle organise chaque année des Journées de la Neutronique et remet un prix d'encouragement à un jeune chercheur.



Un laboratoire spécialisé du LLB sert à la préparation des échantillons biologiques qui seront étudiés sur les spectromètres.

toujours efforcé de mener de front recherche théorique, vérification expérimentale et applications industrielles. En dépit de sa taille modeste, le LLB offre ainsi une structure à la fois fortement intégrée et largement ouverte sur l'extérieur, qui lui permet de répondre aux missions multiples qui lui sont assignées.

### Les missions et l'organisation du LLB

Dès ses premières années de fonctionnement, le LLB a dû apprendre à concilier des impératifs parfois contradictoires : entretenir le parc de spectromètres existant et gérer au mieux son utilisation ; concevoir et mettre en service des appareils adaptés aux nouvelles recherches ; accueillir les chercheurs extérieurs et les aider à réaliser leurs expériences ; poursuivre un programme de recherche propre.

L'équilibre entre ces objectifs a varié suivant les aléas de l'histoire. Aux difficultés de mise en route succède, dans la deuxième moitié des années 1980, une période faste pour la conception instrumentale et la recherche. Mais le long arrêt du réacteur à haut flux (RHF) de l'ILL, entre 1991 et 1994, s'il sacre Orphée comme seule source de neutrons thermiques française, remet en cause l'équilibre antérieur en imposant au LLB une activité de services soutenue (le nombre de visiteurs et de propositions d'expérience double en trois ans). Le Laboratoire étant de surcroît reconnu comme « grande Installation et laboratoire d'accueil » par les autorités européennes, son ouverture aux chercheurs étrangers s'accroît. Le changement d'échelle s'avère

délicat à gérer. L'évolution de la conjoncture scientifique au milieu des années 1990 suscite l'émergence d'un nouveau rôle, qui ne cessera de s'affirmer : la formation des jeunes chercheurs et la pérennisation de la « culture » neutronique dans les milieux scientifiques français. L'effectif du Laboratoire comprend un personnel propre, des collaborateurs de longue durée et des visiteurs occasionnels. L'occupation des aires expérimentales fait l'objet d'une planification précise. Dès la mise en service du réacteur furent instituées des « tables rondes » rassemblant périodiquement, sur des thèmes donnés, chercheurs du LLB et expérimentateurs extérieurs intéressés. Ces assemblées, ponctuées par des exposés de théoriciens, permettaient de procéder à un tour d'horizon général sur une question scientifique, de confronter les points de vue et de définir les programmes expérimentaux pour l'année à venir, un comité de sélection étant associé à chacune. De plus en plus lourdes à mettre en œuvre, elles furent supprimées en 1997, mais auront considérablement marqué l'histoire du Laboratoire.

## L'exploration

### de la matière

En 2007, le parc instrumental du LLB comprend plus de vingt spectromètres disponibles, regroupés en grandes familles suivant leurs caractéristiques techniques propres et le procédé d'analyse qu'ils mettent en œuvre. Si certains sont généralistes et permettent de réaliser une grande variété de mesures, d'autres sont spécialisés dans des créneaux spécifiques, comme la détermination des textures ou la mesure des contraintes résiduelles dans les matériaux. Comme dans toute démarche expérimentale, il faut savoir choisir l'outil approprié à l'échantillon dont on dispose et aux phénomènes que l'on veut mettre en évidence.

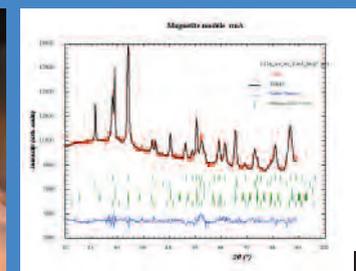
## SOUMETTRE UNE PROPOSITION D'EXPÉRIENCE AU LLB

Comme dans pratiquement tous les Très Grands Équipements (TGE) scientifiques, l'accès des utilisateurs aux installations se fait essentiellement sur la base de l'excellence scientifique. Tout chercheur, qu'il travaille dans une institution française ou étrangère, peut soumettre une proposition d'expérience au LLB (<http://www-llb.cea.fr>), qui sera examinée par des comités d'experts majoritairement extérieurs à l'installation. Les projets doivent comporter deux parties. Le volet administratif permet d'identifier les demandeurs, l'appareil sollicité, les conditions expérimentales souhaitées, le domaine scientifique concerné et les conditions de sécurité de l'expérience. Le volet proprement scientifique décrit l'expérience proposée, son intérêt dans le contexte scientifique général, les résultats attendus. Les comités se réunissent deux fois par an et attribuent du temps de faisceau aux meilleurs projets déposés.

Depuis 1995, le LLB a atteint un régime de croisière, le nombre de projets déposés et acceptés variant peu d'année en année. Sur plus de 500 projets proposés chaque année, 400 environ sont retenus, souvent avec des réductions du nombre de jours de faisceau demandé. La plupart de ces projets mettent en œuvre des collaborations entre plusieurs laboratoires – de plus en plus à l'échelle internationale ; 65 % environ proviennent de laboratoires français, 25 % de laboratoires européens et 10 % du reste du monde. Le laboratoire bénéficie d'ailleurs, depuis 1993, du soutien de programmes européens de financement. Au LLB, l'Europe est depuis longtemps une réalité !



1



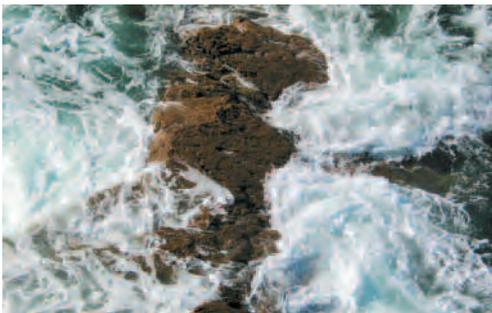
1. Préparation d'une expérience sur l'appareil G6.1.

2. Les spectres de diffraction mesurés sur différentes parties

d'une hache étrusque (photo) révèlent les techniques métallurgiques utilisées pour sa fabrication.

On classe habituellement les propositions d'expériences en quatre grands domaines d'importance voisine : le magnétisme et la supraconductivité (40 % des demandes), les transitions de phases et études structurales (20 %), la physico-chimie et biologie (20 %) et les systèmes désordonnés et les matériaux (20 %). Dans la pratique, un nombre croissant de nouveaux utilisateurs ont été touchés par le travail de formation et de vulgarisation accompli depuis le milieu des années 1990 par les neutroniciens ; rares sont aujourd'hui les domaines de la science

qui ne font pas appel aux neutrons. Les titres des propositions d'expériences ressemblent à des inventaires à la Prévert : à côté des mesures de structure et de dynamique classiques, on trouve de l'archéologie pour étudier la métallurgie des Étrusques, de l'astrophysique pour comprendre les émissions de la matière noire, de la médecine pour améliorer les traitements des calculs rénaux ou de la science des matériaux pour améliorer des composants dans le domaine spatial.



L'écume des vagues est une mousse qui repose sur les propriétés de molécules appelées « amphiphiles ».

Les états de la matière condensée se différencient essentiellement par l'organisation et la dynamique des atomes qui la composent. Dans un solide, qu'il soit cristallin ou amorphe, les atomes ne peuvent se déplacer très loin : ils vibrent autour d'une position d'équilibre dont ils ne quittent jamais le voisinage ; dans un liquide, au contraire, ils se déplacent les uns par rapport aux autres, assurant ainsi les propriétés de fluidité et d'écoulement que l'on connaît.

Entre ces deux états canoniques viennent s'intercaler des situations intermédiaires. Par exemple, un *gel* peut être considéré comme un liquide très visqueux ; une *mousse*, comme un liquide renfermant une grande quantité de bulles de gaz ; et il en existe bien d'autres encore. Ces états ont été regroupés sous le vocable de « matière molle », dont les propriétés suscitent un grand intérêt dans des domaines aussi variés que les cosmétiques, les peintures, la pétrochimie ou la médecine.

Dans les solides, du point de vue structural, deux possibilités extrêmes d'ordre peuvent se manifester.

Dans un cristal, les atomes sont disposés de manière régulière et ordonnée. Ils forment une structure périodique, répétant « à l'infini » une maille élémentaire et faisant apparaître une multitude de lignes d'atomes et des plans atomiques. Cette maille élémentaire peut contenir un motif de quelques atomes comme plusieurs milliers (dans les cristaux de protéines).

Pour certains solides, en revanche, comme le verre, les atomes ne sont pas rangés régulièrement. Ils restent en contact les uns avec les autres, obéissant à des règles de voisinage, mais

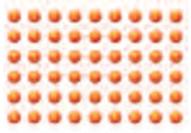
sans ordre à longue distance – un peu comme des billes dans un sac. On dit que ces matériaux sont « amorphes ».

Le rôle d'une expérience de diffusion neutronique est de révéler l'organisation et la dynamique des atomes d'un échantillon de matière condensée, en faisant interagir ceux-ci avec un faisceau de neutrons dont les caractéristiques sont connues. Quatre types de mesures sont envisageables :

- pour connaître la position des atomes à un instant  $t$ , comme si l'on « photographiait » la matière, on comptabilise tous les neutrons diffusés, sans se soucier de savoir s'ils ont changé ou non d'énergie suite à l'interaction avec les diffuseurs de l'échantillon ;
- pour rechercher une information sur les positions des points d'équilibre autour desquels vibrent les atomes, on collecte seulement les neutrons diffusés sans variation d'énergie, par diffusion élastique ;
- pour déterminer la structure magnétique de la matière, on analyse directement ou indirectement les effets de la diffusion magnétique de neutrons polarisés ;
- pour étudier la dynamique des atomes et déterminer, par exemple, les populations de phonons et de magnons dans un cristal, on recueille les neutrons diffusés avec changement d'énergie, par diffusion inélastique (voir p. 90).

Dans tous les cas, la réalisation d'une expérience comporte trois étapes :

1. La préparation d'un faisceau de neutrons avec des caractéristiques de direction, de vitesse (longueur d'onde) et éventuellement de polarisation déterminées ;

	ÉTATS DE LA MATIÈRE		
	(a) Solide cristallin	(b) Solide amorphe	(c) liquide
<b>Structure</b>			
<b>Dynamique</b> Trajet du centre de gravité d'un atome au cours du temps			
Les structures instantanées du liquide et de l'amorphe sont à première vue très proches. La véritable différence entre les deux phases réside dans la dynamique des atomes.			



Mise en place d'un échantillon dans un cryostat sur Mibémol (G 6.2).

2. L'interaction du faisceau avec l'échantillon soumis à des conditions de température, de pression ou de champ magnétique choisies par l'expérimentateur ;

3. La détection des neutrons et l'analyse de leurs nouvelles caractéristiques après interaction avec la matière. Les changements de caractéristiques sont ensuite interprétés en termes de structure, de dynamique et de magnétisme de l'échantillon.

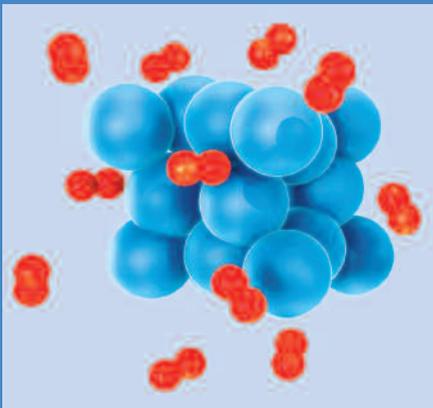
### La préparation des neutrons

Grâce à ses deux sources froides et à sa source chaude, Orphée produit des faisceaux de neutrons dont les longueurs d'onde se distribuent autour de trois valeurs : neutrons thermiques (autour de 1,5 Å) ; neutrons froids (autour de 4 Å) ; neutrons chauds (autour de 0,8 Å). Mais ces valeurs ne correspondent qu'à des moyennes et tous les faisceaux sont « polychromatiques », c'est-à-dire qu'ils contiennent des neutrons de longueurs d'onde, et donc de vitesses diverses. Or la plupart des expériences de diffusion neutronique requièrent de connaître avec précision la longueur d'onde des neutrons incidents. Il faut donc extraire un faisceau monochromatique du faisceau originel. On emploie pour ce faire un module appelé « monochromateur ».

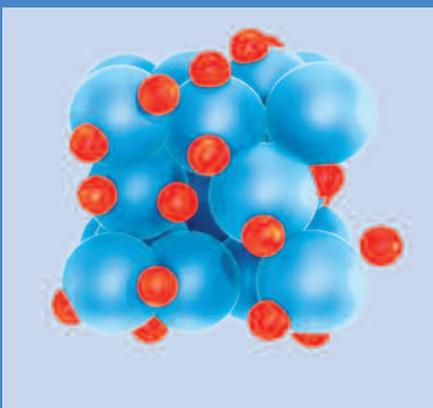


## LE DOUBLE JEU DE L'HYDROGÈNE ET DU DEUTÉRIUM

Dès la mise en service du dispositif expérimental d'Orphée, les chercheurs du LLB tirent profit de la forte interaction existant entre les atomes d'hydrogène et les neutrons thermiques (qui diffèrent en cela des rayons X). En remplaçant tout ou partie des atomes d'hydrogène par du deutérium, on fait varier le « contraste neutronique » (les neutrons interagissant différemment avec les isotopes d'un même élément chimique), ce qui permet de révéler l'organisation des objets les plus complexes. Certains composés intermétalliques ont la



Adsorption/desorption d'hydrogène



propriété d'absorber d'énormes quantités d'hydrogène de façon réversible, à des températures proches de la température ambiante. Ils constituent une solution potentielle pour la fabrication de réservoirs à hydrogène sûrs pour les futurs véhicules non polluants. Le composé  $\text{LaNi}_5$  a été probablement le plus étudié à ce titre. Les capacités de stockage d'hydrogène de ce composé augmentent lorsqu'on substitue en partie de l'étain (Sn) au lanthane (La) ou au nickel (Ni). Les mesures de diffraction de neutrons avec des hydrures deutérés ont permis de montrer que la localisation de l'hydrogène restait identique dans les composés binaires (sans étain) et ternaires (avec étain).

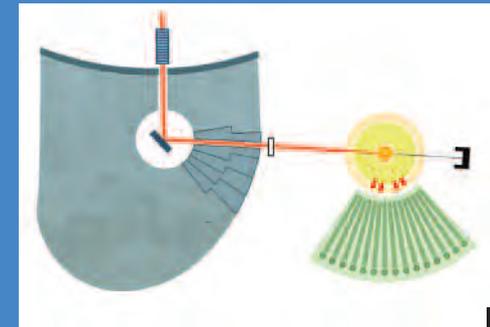


## UN « CHEVAL DE TRAIT » TOUJOURS JEUNE : LE DIFFRACTOMÈTRE DE POUVRE 3T2

Servant à mesurer le spectre de diffraction d'une poudre par un faisceau de neutrons thermiques, 3T2 est un spectromètre 2 axes à haute résolution installé dans le Hall Réacteur en 1981-1982. Inspiré de l'appareil D1A de l'ILL, il fait partie des 7 nouveaux appareils conçus à l'occasion du démarrage d'Orphée.

Composé à l'origine d'un double dispositif à monocompteur et à multicompteur fonctionnant en alternance, 3T2 a bénéficié, grâce au financement de la région Aquitaine, d'améliorations régulières qui en font une bonne illustration de l'adaptation régulière des moyens expérimentaux d'Orphée. « Ce type d'appareil est très demandé, commente Alain Menelle. C'est le "cheval de trait" des appareils de diffraction de

neutrons, et bien souvent le point d'entrée des chercheurs débutant dans la discipline, les expériences y étant assez faciles à réaliser et à interpréter ». Des gains appréciables de flux ont été obtenus, tandis que le nombre de compteurs était porté de 10 à 20, puis à 50 en 2005, afin de répondre aux besoins de la recherche sur les nouveaux matériaux d'intérêt technologique. 3T2 concentre en particulier de nombreuses collaborations extérieures dans le domaine des oxydes à propriétés remarquables. Un agrandissement de la taille de faisceau arrivant sur le monochromateur focalisant devrait permettre d'améliorer encore le flux neutronique sur cet appareil.



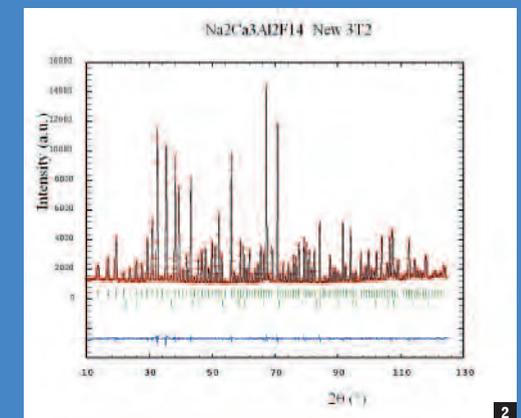
1. Le spectromètre 2 axes 3T2.

2. Diagramme de poudre typique mesuré sur le spectromètre de l'aire 3T2.

La comparaison entre le spectre mesuré et celui calculé pour une

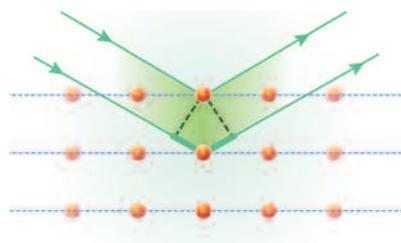
structure donnée permet d'ajuster différents paramètres comme la position des atomes.

3. Mise en froid du cryostat pour la mesure à des températures de 1.5K à 300K sur l'aire 3T2.



2

3



### La loi de Bragg

Les processus de l'interaction entre les neutrons et la matière conduisent, lorsque l'échantillon est un solide cristallin, à une diffusion des neutrons satisfaisant à la loi de Bragg. Selon cette loi, les plans cristallins apparaissent comme des miroirs qui réfléchissent les rayonnements dont la longueur d'onde est de l'ordre de la distance inter-atomique, avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence  $\theta$  – mais à la différence des miroirs des salles de bain,  $\theta$  ne peut pas être quelconque ! Il satisfait à la relation :

$$2d \sin \theta = k\lambda$$

$d$  = distance entre plans atomiques

$\theta$  = angle de Bragg

$k$  = nombre entier



1. Un monochromateur à lames de graphite.

2. Un physicien installe un échantillon au centre du spectromètre 6T2 modernisé avec le soutien de Rennes Métropole.

Il en existe deux types. Le premier utilise une propriété des cristaux : la diffraction sélective des rayonnements neutroniques suivant la loi de Bragg. Lorsque l'on place sur le chemin du faisceau polychromatique un monocristal, on génère un ensemble de faisceaux monochromatiques bien séparés qu'il est aisé d'isoler par des écrans astucieusement disposés. En choisissant la nature du cristal et ses paramètres (il s'agit le plus souvent de cuivre, de germanium ou graphite pyrolytique), on obtient les faisceaux incidents de longueur d'onde souhaitée. Certains de ces monochromateurs focalisent le faisceau, afin d'augmenter le flux arrivant sur l'échantillon.

Le second est un système mécanique : on fait tourner sur un axe, à vitesse constante, soit un cylindre en matériau absorbant entaillé de sillons hélicoïdaux soit une série de disques comportant chacun une fente. Seuls les neutrons d'une vitesse déterminée sont transmis, les autres étant absorbés.

Certaines études de structures magnétiques (voir p. 85) utilisent un faisceau de neutrons incident polarisé – c'est-à-dire un faisceau dont les spins portés par les neutrons sont alignés



suivant une direction précise (vers le haut ou vers le bas). Pour ce faire, on utilise soit des monochromateurs polarisants, soit des Super Miroirs qui, placés sous champ magnétique, réfléchissent uniquement les neutrons dont le spin est dirigé vers le haut ; un « flipper », créant un fort gradient de champ, permet d'obtenir ensuite une polarisation vers le bas.

En définitive, l'ensemble instrumental utile à la préparation du faisceau comporte généralement un monochromateur, un collimateur chargé de diriger le faisceau avec précision, un moniteur mesurant le flux incident, un filtre chargé de l'épurer de toute longueur d'onde parasite et d'autres éléments optiques plus ou moins élaborés de polarisation ou de focalisation. Toute cette partie amont constitue le « spectromètre primaire ».

### Les diffractomètres

Le principe d'un diffractomètre est de détecter, pour chaque position d'un échantillon, les neutrons ayant changé de direction après interaction avec les noyaux atomiques ou les moments magnétiques.

Lorsque l'échantillon est cristallin, les directions selon lesquelles les neutrons sont diffusés correspondent précisément aux angles de Bragg ; en étudiant la répartition et les intensités de ces pics, on peut caractériser le réseau des plans atomiques, la position des atomes dans cette maille élémentaire et, finalement, la structure du cristal. Dans la vie courante, les solides cristallins sont rarement constitués d'un seul cristal, mais d'une multitude de grains intimement soudés entre eux et orientés dans toutes les directions. Les plans atomiques, bien définis à l'intérieur de chaque grain, subissent une rupture d'orientation lorsque l'on passe de l'un à l'autre. Nombre de propriétés des matériaux (comme leur résistance mécanique) dépendent non seulement de leur structure cristalline et du contenu de la maille élémentaire, mais aussi de la forme, de la taille, de la distribution et de l'orientation des grains cristallins qui les composent – ce que l'on appelle la microstructure des matériaux.

### Les pics de Bragg

La théorie de la diffusion montre qu'il y a une relation de dualité entre la taille d'un cristal et la largeur des pics de Bragg : plus le cristal est petit, plus les pics de Bragg sont larges – et inversement. L'analyse précise de la forme des pics de Bragg fournit donc des informations sur la taille et la distribution de ces objets. Par exemple, cette technique est utilisée avec des neutrons (ORPHEE) et des photons X (SOLEIL) par des équipes du CNRS et du LLB associées aux hôpitaux Necker et Tenon pour mieux comprendre la composition et la taille des petits grains qui constituent les calculs rénaux, responsables des coliques néphrétiques.

Pour mesurer tous ces paramètres, on utilise un diffractomètre 2 axes. Dirigé sur un polycristal ou une poudre composée de milliers de grains orientés aléatoirement, un faisceau de neutrons trouve statistiquement un grand nombre de grains en position de Bragg – et cela pour chaque famille de plan, quelle que soit la position de l'échantillon. Il va se trouver diffracté dans des directions et avec des intensités caractéristiques de la structure cristalline du matériau. Il suffit alors de faire tourner un détecteur sur un axe centré sur l'échantillon, ou d'utiliser un multidécteur, pour mesurer le spectre de diffusion de ces pics de Bragg. Le spectre obtenu est appelé « diagramme de poudre ». Un deuxième axe de rotation, autour du monochromateur, permet de sélectionner le faisceau incident souhaité. Du fait de sa simplicité, cette technique ne peut pas toujours apporter toutes les informations recherchées sur la matière. Il faut alors se lancer dans une exploration très précise de chaque cristal. C'est ici que les difficultés commencent.



D'une part, il faut trouver des cristaux naturels purs, ou les fabriquer en laboratoire. D'autre part, un faisceau monochromatique dirigé sur un monocristal positionné sans précaution n'a qu'une chance infime de rencontrer des plans atomiques satisfaisant à la relation de Bragg et d'être réfléchi vers le détecteur... Aussi utilise-t-on un système qui permet d'orienter le cristal dans toutes les directions possibles par rapport au faisceau incident : le diffractomètre 4 cercles. Si le polycristal constitue un premier pas vers le désordre, son organisation reste celle de réseaux cristallins. Dans un liquide ou un

amorphe, le désordre atteint l'échelle atomique – comme si les grains étaient infiniment petits. Le spectre de diffraction devient alors moins structuré et des pics larges et diffus se substituent aux pics étroits de Bragg. Leur analyse fournit des informations statistiques sur les distances entre atomes et le voisinage de chacun d'eux (ou « ordre local »).

Il existe par ailleurs une diffusion qui n'est pas liée au détail de la structure atomique, mais est tout aussi bien générée par les cristaux, les liquides, les amorphes, les objets biologiques et autres entités atomiques ou magnétiques : la diffusion vers l'avant. Un peu comme les pics de Bragg, le pic de diffusion vers l'avant présente une largeur et un profil lié à la taille et à la forme des objets, et plus généralement aux fluctuations au sein de l'échantillon. Habituellement, ce pic élargi est masqué par la partie du faisceau direct qui a traversé l'échantillon sans être diffusée. Pour le faire apparaître, il faut utiliser un faisceau



1. Un chercheur analyse l'expérience en cours sur 5C1.

2. Diffractomètre 4 cercles.

2



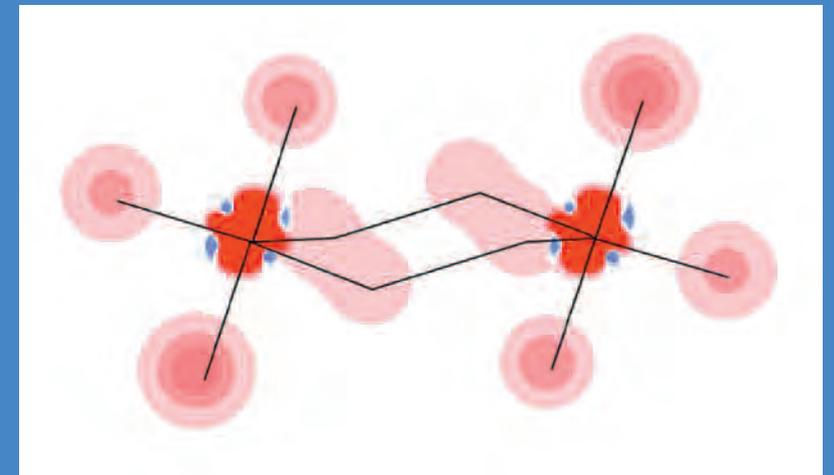
## LE MAGNÉTISME MOLÉCULAIRE

Les aimants ont discrètement envahi notre quotidien. Plus d'une vingtaine d'entre eux sont indispensables au fonctionnement de notre voiture ! On leur en demande toujours plus et, pour cela, ils doivent parfois posséder des propriétés que les aimants classiques, à base de matériaux magnétiques, comme la ferrite, ne possèdent pas...

De nouveaux types d'aimants, faits de blocs moléculaires, offrent des potentialités et des intérêts pratiques énormes : s'ils possèdent les propriétés typiques des aimants classiques, ils peuvent également être transparents, légers, isolants ou photocommutables. L'arsenal des techniques de fabrication dont dispose désormais le génie chimique permet de fabriquer les architectures moléculaires les plus complexes : si l'on imagine une structure moléculaire offrant les propriétés souhaitées, la chimie saura la réaliser. Le magnétisme de

ces composés particuliers demeure cependant mal connu. Alors que dans les aimants classiques les moments magnétiques sont localisés sur les atomes métalliques, dans les aimants moléculaires la densité magnétique se distribue entre plusieurs sites – les théories actuelles ne réussissant pas toujours à prédire ces effets. Les neutrons étant sensibles au magnétisme, ils permettent de mesurer aisément cette densité magnétique et sa répartition entre les atomes constituant la molécule. Au LLB, les travaux ont principalement porté sur la nature et le mécanisme des interactions magnétiques entre ions métalliques, via différents types de pont organique dans des composés bimétalliques. Ces mesures permettent d'affiner les théories existantes, de manière à pouvoir un jour prédire avec exactitude la structure moléculaire capable de fournir le matériau possédant la propriété nouvelle qui améliorera notre quotidien.

Densité magnétique mesurée dans  $[\text{Cu}_2\text{L}_2(\text{N}_3)_2]$  à 2 K pour un champ de 5 Tesla. La plus grande partie est portée par les atomes de cuivre qui sont non magnétiques à l'état métallique.





## LA DÉTECTION DES NEUTRONS

L'histoire l'a montré, le neutron est une particule furtive. Pour la détecter, il faut mettre en jeu une réaction nucléaire. La plupart des détecteurs fonctionnent suivant le principe suivant : on remplit un volume d'un gaz composé de molécules absorbant fortement les neutrons et émettant, en retour, une particule chargée. Accélérée par un champ électrique, celle-ci va se cogner aux autres atomes du gaz et les ioniser en produisant des électrons secondaires. La cathode récolte ces

Un technicien monte une série de détecteurs sur le spectromètre à temps de vol Mibémol.

électrons et donne une impulsion électrique. C'est cette impulsion que l'on mesure. Afin d'explorer un secteur angulaire aussi vaste que possible, on utilise couramment un banc de détecteurs individuels, ou un détecteur étendu donnant la position de l'atome ayant absorbé le neutron (multidétecteur à 1 dimension du type « banane » ou à 2 dimensions du type « XY »).



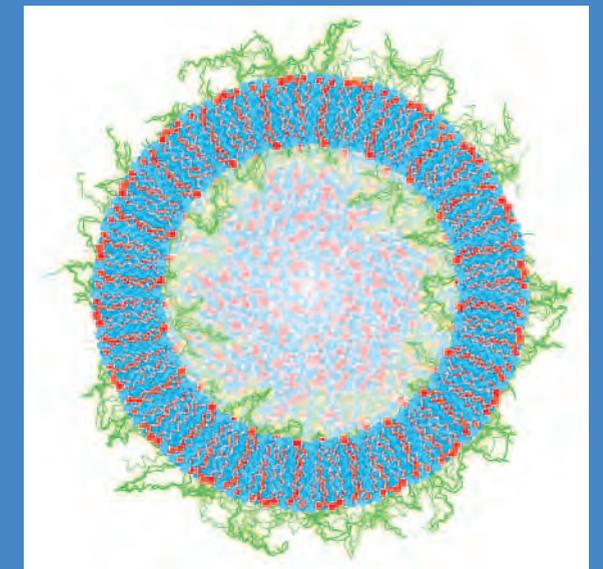
## LES VÉSICULES ARTIFICIELLES

Les polymères sont des objets d'étude privilégiés pour la diffraction aux petits angles en raison de leurs grandes dimensions. À partir de 1985, le groupe de physicochimie du LLB s'intéresse plus particulièrement aux capacités d'adsorption des polymères aux interfaces : si l'on greffe des chaînes de polymères à une interface, on en modifie les propriétés, que l'analyse aux petits angles permet de déterminer avec précision. Ces recherches débouchent, dans le courant des années 1990, sur de fructueuses applications sur les colloïdes et les systèmes moléculaires organisés (tels les systèmes biologiques). On commence en particulier à s'intéresser au comportement sous déformation des chaînes de polymères et des systèmes qui y sont éventuellement associés. Ces avancées théoriques et expérimentales contribuent à donner une forte impulsion aux études de vésicules dans les années 1996-1998.

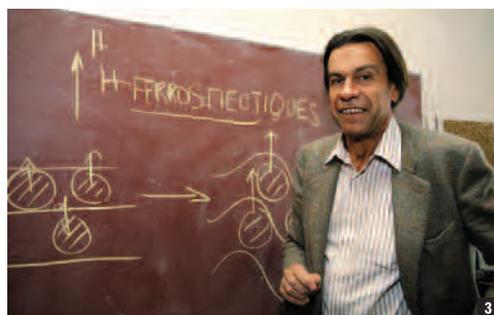
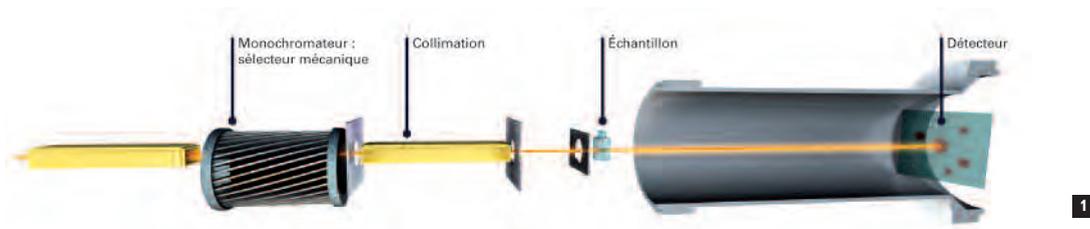
Les vésicules artificielles sont conçues sur le modèle des cellules vivantes : une membrane fermée composée d'une bicouche de molécules contient un liquide totalement isolé du milieu extérieur ; cette membrane étant faiblement rigide, la vésicule est capable de se déformer, notamment sous l'influence des variations thermiques. On obtient ainsi un parfait microréservoir pour véhiculer des médicaments ! Le problème, c'est qu'une fois introduits dans le corps humain, ces systèmes ne sont guère stables... Aussi a-t-on pensé, en appliquant des résultats déjà obtenus sur les petites particules solides en suspension, à greffer à leur surface des chaînes de polymères. Et l'on a observé, en associant

diffusion neutronique aux petits angles avec marquage isotopique, diffusion de la lumière et microscopie électronique, les conséquences de cette greffe sur des systèmes de vésicules assez petites (20 à 500 nm de diamètre) : variation de leur forme et de leur taille en fonction des conditions de préparation ; positions et interactions des différents constituants.

Les résultats obtenus par l'équipe du LLB sont encourageants : si les polymères permettent d'uniformiser la forme et la taille des vésicules et de renforcer la membrane, ils ne compromettent pas leur ductilité. Le polymère favoriserait une courbure préférentielle sans pour autant rigidifier le système ni modifier la dynamique des échanges à l'interface. La mise en service du nouvel appareil à très petits angles permettra d'approfondir ces premières conclusions.



Vue schématique d'une coupe d'une vésicule dont la membrane est formée d'une bicouche de molécules avec polymères.



1. Schéma d'un spectromètre pour diffusion aux petits angles.

2. Sur l'appareil de diffusion aux petits angles PAXE du LLB, un étudiant prépare une expérience sur les biopolymères avec le responsable technique de l'appareil.

3. Les appareils de diffusions de neutrons ont permis de nombreuses vérifications expérimentales des prédictions théoriques du prix Nobel de physique Pierre-Gilles de Gennes, notamment dans le domaine des polymères.

incident de grande longueur d'onde, et positionner un détecteur étendu (XY) à une grande distance de l'échantillon (de 1 à 7 m). Le pic élargi débordant du faisceau direct peu divergent, on peut alors mesurer ce qu'on appelle la « diffusion aux petits angles ». Il existe une vingtaine d'appareils de ce type dans le monde ; le LLB en possède trois dont un pour les très petits angles (TPA), dédié à l'analyse des nanostructures de plus de 50 nm.

### Les réflectomètres

Au début des années 1980, s'est développée une nouvelle utilisation des faisceaux de neutrons : l'étude des interfaces par réflexion totale des rayonnements – jusqu'alors plutôt réalisée avec des rayons X. Lorsqu'on envoie un faisceau de neutrons à l'interface de deux milieux de nature différente, il y a, comme avec n'importe quelle onde, apparition d'un faisceau réfléchi ; et si le faisceau incident est suffisamment rasant, il peut même y avoir réflexion totale. En mesurant les variations d'intensité de ces réflexions (« courbe de réflectivité »), on peut étudier, avec une grande précision, l'organisation des atomes et molécules au voisinage d'une interface et leur structure en couches.

Les premières expériences de ce type ont été menées au LLB à l'aide d'un spectromètre de diffusion aux petits angles légèrement modifié, en utilisant soit l'analyse angulaire, soit la méthode de temps de vol. Puis a été élaboré le prototype Désir (« Dispositif d'étude des surfaces et interfaces par réflexion »), premier pas vers la construction d'un appareil spécifique : le réflectomètre Éros (« Étude par réflexion de l'organisation des surfaces »), en service depuis 1991.

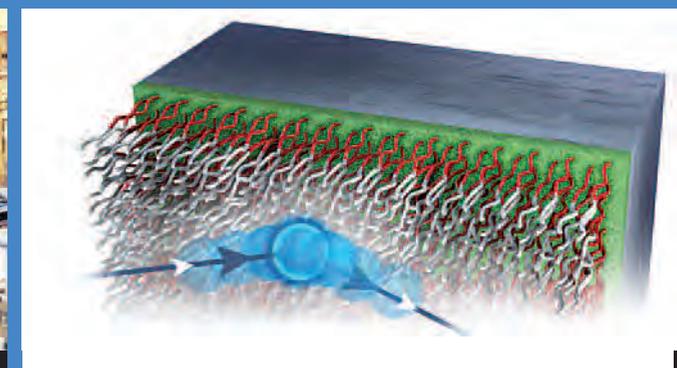
## LES POLYMÈRES AUX INTERFACES

Au milieu des années 1980, Bernard Farnoux, présentant les potentialités des réflectomètres à neutrons, décide de développer au LLB le spectromètre Désir, destiné aux études des surfaces liquides. Deuxième appareil de ce type dans le monde après CRISP à ISIS (Oxford, Royaume-Uni), Désir est d'abord utilisé pour démontrer l'existence d'une couche riche en polymères à la surface d'une solution de polymères (1988). Grâce à l'utilisation de la substitution isotopique, qui permet de faire varier le contraste entre le polymère et le solvant, on obtient, en 1991, la détermination du profil de concentration du polydiméthylsiloxane (PDMS) adsorbé à la surface du toluène. De nombreuses configurations de polymères et de solvants sont employées pour vérifier la cohérence des résultats. Ces mesures apportent une démonstration éclatante que la théorie des lois d'échelles est la mieux adaptée à la description du profil de concentration de la couche adsorbée. La réflectivité est ensuite appliquée à l'étude des conformations des chaînes de polymères greffées chimiquement à une surface (1992). De tels systèmes sont utilisés dans les puces ADN pour accrocher à une surface des

molécules devant rester mobiles dans le liquide qui les entoure. Suivant la densité du greffage, les chaînes adoptent une conformation recroquevillée, dite « en champignon », ou allongée, dite « en brosse ». Le passage d'un régime à l'autre s'effectue lorsque la distance entre les chaînes greffées diminue. Les neutrons fournissent la première mise en évidence expérimentale de cette transition (1993). Plus récemment, les centres d'intérêt du LLB se sont orientés vers l'étude des systèmes aqueux présentant un fort intérêt environnemental, en particulier celle des polymères hydrosolubles. Le poly (N-isopropylacrylamide) (PNIPAM), polymère thermosensible utilisé en cosmétique, s'adsorbe ainsi spontanément à la surface de l'eau. La réflectivité de neutrons a été utilisée pour comprendre les mécanismes contrôlant ses changements de solubilité et de conformation à la surface du liquide (1999).

1. Un des laboratoires de chimie du LLB utilisé pour la préparation des échantillons.

2. Schéma de principe d'une mesure de réflectivité sur une couche de copolymère accroché à une surface de silicium.



## Les spectromètres pour diffusion inélastique

Les mesures de diffraction des neutrons ne permettent pas d'étudier les mouvements des atomes. Dans un solide, les atomes vibrent autour de leur position d'équilibre – mais comment, et avec quelle fréquence ? Dans un liquide, ils se déplacent à grande distance – mais selon quels mécanismes, et à quelle vitesse ? Un diffractomètre ne donne des informations que sur la position instantanée des atomes ou des moments magnétiques, comme on les verrait sur une photo prise à grande vitesse. Or, pour répondre à ces questions de dynamique, on doit mesurer la variation d'énergie des neutrons dans le processus de diffusion, c'est-à-dire étudier le phénomène de diffusion inélastique.

Il y a deux manières de procéder. Soit l'on considère la nature ondulatoire du neutron, et l'on mesure le transfert d'énergie par la variation de longueur d'onde : c'est le principe du spectromètre à 3 axes. Soit l'on considère la nature corpusculaire du neutron, et l'on mesure la variation de vitesse provoquée par le même transfert d'énergie : c'est le principe du spectromètre à temps de vol.

Dans un spectromètre à 3 axes, on ajoute au système à 2 axes un dispositif permettant de déterminer la composition en longueur d'onde du faisceau diffracté : on place sur le parcours de celui-ci un cristal analyseur, qui agit sur le modèle du cristal monochromateur en ne réfléchissant que la composante d'une longueur d'onde déterminée ; en le faisant tourner, on explore la contribution des longueurs d'ondes successives du faisceau que l'on redirige vers un compteur.

Dans un spectromètre à temps de vol, on mesure le temps mis par les neutrons pour parcourir la distance qui sépare le détecteur de l'échantillon. Pour cela, il faut d'abord sélectionner, à l'aide d'un monochromateur à disques, des bouffées de neutrons incidents ayant tous la même vitesse. Tous les neutrons de la bouffée arrivent simultanément sur l'échantillon. Mais ceux qui gagnent de l'énergie repartent à une vitesse plus élevée et arrivent les premiers



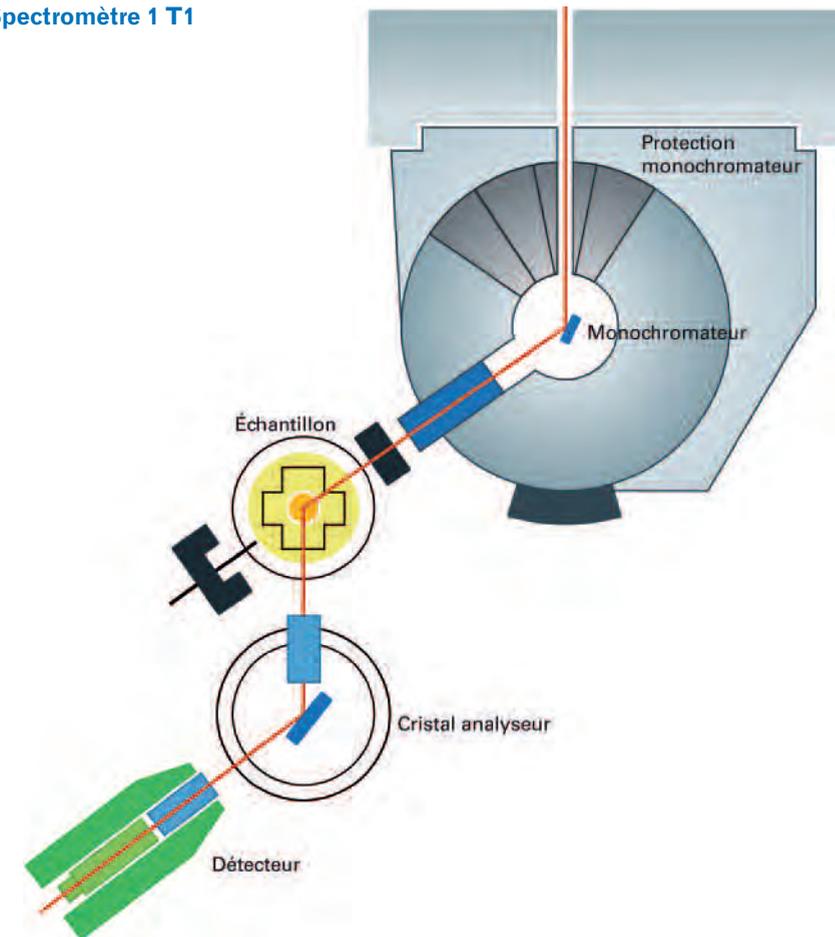
Un monocristal sur son support, prêt à être mesuré sur un des 4 cercles du laboratoire.

sur le détecteur, tandis que ceux qui perdent de l'énergie repartent plus lentement et arrivent les derniers. Ainsi, la classification en temps d'arrivée n'est autre qu'une classification en transfert d'énergie. Pour obtenir un spectre analysable, on répète l'opération pour chaque bouffée produite par le monochromateur (à chaque tour de roue), et l'on installe plusieurs centaines de détecteurs afin de couvrir le plus grand nombre d'angles de diffraction possible.

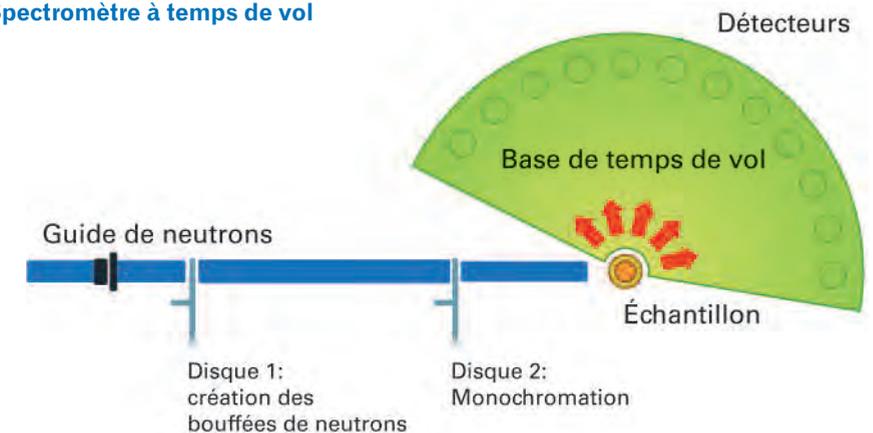
Dans la pratique, sans être systématique, on utilise plutôt la technique du 3 axes lorsque le transfert d'énergie est grand ( $>1$  meV) et la technique de temps de vol lorsqu'il est petit (entre 0,01 et 1 meV).

Lorsque le transfert d'énergie est encore plus faible (dans la gamme des microélectrons-volts), on utilise une technique très particulière appelée « l'écho de spin ». On ne mesure plus alors les variations de longueur d'onde ou de vitesse, trop faibles pour être détectées avec fiabilité, mais les éventuelles modifications d'orientation du spin des neutrons.

## Spectromètre 1 T1



## Spectromètre à temps de vol



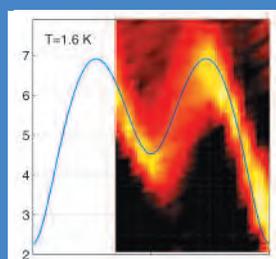
## LES PHONONS

Dans un solide cristallin, les atomes ne vibrent pas indépendamment les uns des autres : ils interagissent entre eux, comme s'ils étaient liés par un ressort. Le déplacement d'un atome conduit à celui de son voisin, qui provoque à son tour celui de son voisin, etc. : de proche en proche, tous les atomes du cristal bougent. L'énergie d'un mode de vibration cristalline est quantifiée : elle ne peut augmenter que par petits « paquets » élémentaires,



Deux doctorants se concertent avant de démarrer une expérience sur un spectromètre 3-axes.

Calcul (courbe bleue) et mesure d'une excitation dans  $KCuCl_3$ . Energie en meV en fonction du vecteur d'onde. Ce type de mesure est un test très sévère des théories utilisées pour



comprendre les interactions inter-atomiques ce qui permet de les valider ou les infirmer.

qui se manifestent sous la forme d'une onde ou de sa pseudo-particule associée, appelés « phonons » (du grec  $\varphi\omega\nu\eta$ , « voix »). Lorsqu'un neutron incident modifie le mouvement d'un atome, il affecte la population de phonons, soit en en créant, soit en en détruisant. Mais la loi de conservation de l'énergie impose qu'il cède (dans le premier cas), ou récupère (dans le second) l'énergie nécessaire à ce processus. Dans les deux cas, le neutron ressort de l'échantillon avec de nouvelles caractéristiques.

La diffusion inélastique des neutrons est l'une des très rares techniques qui permettent d'établir le spectre de phonons d'un solide cristallin. Les phonons jouent en effet un rôle essentiel dans un grand nombre de propriétés physiques des solides, comme la conductivité électrique et thermique ou la capacité à véhiculer le son. L'un des premiers objets d'étude à Saclay, dans les années 1970, fut le chlorure de cuivre, semi-conducteur dont les propriétés singulières, utilisées en optique non linéaire, sont liées aux modes de vibration du réseau cristallin. Ces mesures uniques sont essentielles à la validation des modèles théoriques décrivant les interactions entre atomes. Au début des années 2000, elles ont été utilisées pour valider les nouvelles méthodes numériques calculant les propriétés cristallines en utilisant une approche ab initio directement à partir des premiers principes.

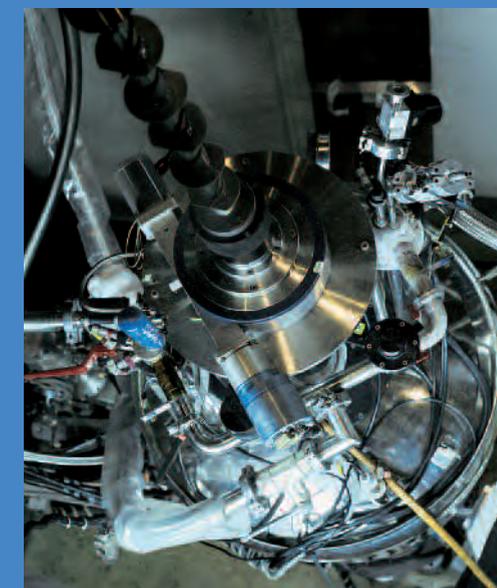
## SUPRACONDUCTIVITÉ À HAUTE TEMPÉRATURE : LES FAISCEAUX DE NEUTRONS D'ORPHÉE APPORTENT UN NOUVEL ÉCLAIRAGE SUR LE PHÉNOMÈNE

Vingt ans après la découverte des supraconducteurs à haute température critique, la compréhension des mécanismes à l'origine de cette supraconductivité est encore loin d'être établie. Depuis la découverte, en 1986, des supraconducteurs à haute température critique, la supraconductivité n'est plus confinée aux températures très basses, mais la théorie permettant d'expliquer les performances de ces matériaux à base d'oxyde de cuivre reste à découvrir. Grâce à des expériences menées en 2005 sur Orphée, les chercheurs du LLB ont levé le voile sur l'une des phases les plus obscures de ces matériaux.

Paradoxalement, ce n'est pas la phase supraconductrice qui résistait jusqu'ici à la compréhension des chercheurs, mais l'existence d'une phase intermédiaire entre l'état métallique normal et l'état supraconducteur. Cette phase, appelée phase de pseudo-gap, présente de nombreuses propriétés électroniques anormales. Plusieurs modèles théoriques ont été proposés pour la décrire. Celui du professeur C.M. Varma, de l'Université de Riverside (Californie), postule un ordre caché d'où émergerait l'état supraconducteur de la matière : en dessous d'une certaine température, apparaîtrait un nouvel état de la matière, dans lequel des boucles microscopiques de courant électrique se formeraient de manière spontanée. Les résultats des travaux du LLB tendent à valider ce modèle. L'équipe a fait diffuser un faisceau de neutrons polarisés sur plusieurs

échantillons supraconducteurs à haute température critique. L'expérience a mis en évidence dans la phase de pseudo-gap l'existence d'un ordre magnétique caché, qui serait la signature de ces courants microscopiques circulant à l'intérieur de chaque maille élémentaire. Cette découverte constitue assurément l'une des clés qui permettra de mieux comprendre les propriétés de ces matériaux révolutionnaires que sont les supraconducteurs à haute température critique – et par la suite la nature exacte de la phase supraconductrice à haute température.

Vue du dessus d'une des bobines supraconductrices utilisées au LLB pour les mesures sous fort champ magnétique.





Le spectromètre à écho de spin « Mess ».

Le principe est le suivant : plongé dans un champ magnétique vertical, le spin d'un neutron tourne dans le plan perpendiculaire au champ, avec une vitesse angulaire donnée – telle l'aiguille d'une montre. Pour détecter les changements d'énergie, on fait traverser au faisceau deux bobines identiques (dites « de précession »), mais créant des champs magnétiques de sens opposés, avant et après l'interaction avec l'échantillon.

Entre le polariseur et ce dernier, le spin du neutron va ainsi parcourir un nombre donné  $n$  de tours caractéristique du champ magnétique. Mais voilà que, au-delà de l'échantillon, on inverse le champ magnétique ! Les spins tournent dans l'autre sens... Un neutron n'ayant subi aucun changement d'énergie se retrouvera, à la sortie de la bobine, à son point de départ – d'où

« l'écho » de spin. Mais si le choc est inélastique et que la vitesse du neutron change, l'orientation du spin à l'arrivée sera différente. Ces différences d'orientation se traduisent par une diminution de la polarisation qui permet de remonter au spectre énergétique.

Outre sa grande sensibilité, la force de cette technique réside dans le fait que la perte de polarisation dépend peu de la longueur d'onde : on peut donc utiliser des faisceaux intenses peu monochromatiques.

D'un point de vue plus général, l'évolution des techniques de spectrométrie neutronique et le renouvellement des thématiques scientifiques imposent la réorganisation et l'amélioration régulières du parc instrumental. Il est nécessaire, d'une part, d'adapter les outils aux nouvelles demandes, d'autre part d'améliorer la finesse, la

## DE MESS À MUSES

C'est en 1982 que l'inventeur de la technique de l'écho de spin, le Hongrois Ferenc Mezei, et le nouveau directeur du LLB, Gérard Janninck, décident de doter Orphée d'un appareil de ce type, le second en France après l'IN11 de l'ILL. Installé sur le poste expérimental G3.2, le spectromètre Mess (« Mesures par Écho de SpinS ») est conçu avec la participation de l'Institut de Recherches Physiques de Budapest, qui réalise le bâti en aluminium, le sélecteur mécanique de vitesse et les supermiroirs polariseurs. Les premiers échos sont obtenus le 14 juillet 1986. L'appareil est employé pour étudier le magnétisme ainsi que les mouvements très lents des grosses molécules en biochimie et en physicochimie. En 1992, Mess bénéficie de plusieurs perfectionnements. L'objectif est d'améliorer autant que possible le flux neutronique afin de compenser l'indisponibilité d'IN11 durant l'arrêt du RHF. Son utilisation se recentre sur la dynamique des ferrofluides et surtout des polymères, participant notamment à la validation expérimentale de la théorie de la reptation des chaînes de Pierre-Gilles de Gennes.

Très spécialisé, Mess s'avère mal adapté à d'autres domaines de la physique. Sa compétitivité va encore être réduite par l'émergence d'une nouvelle technologie d'écho de spin : la spectrométrie par résonance.

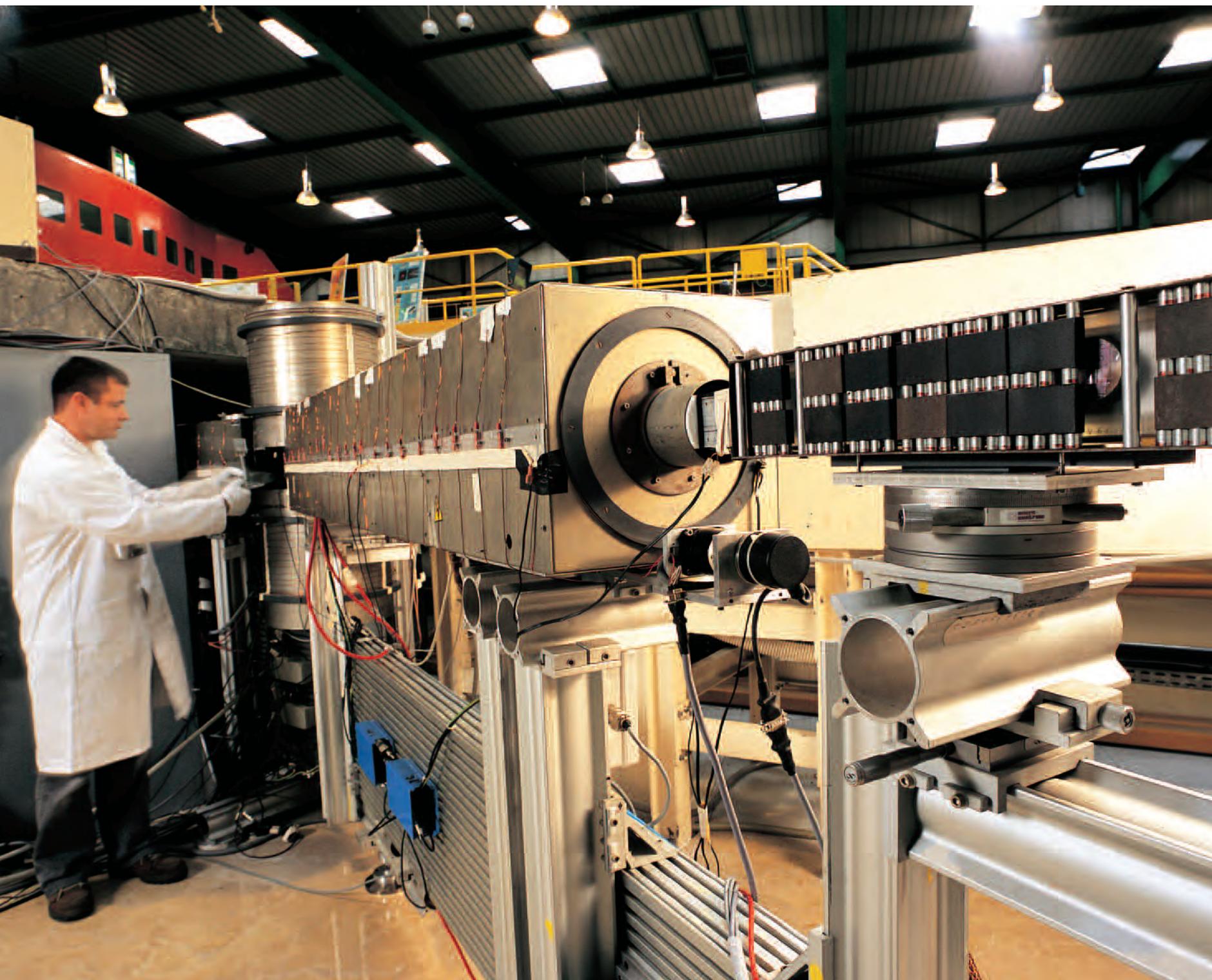
En 1987, les physiciens allemands Roland Gähler et Robert Golub proposent un nouveau schéma d'appareil, le « Neutron Resonance Spin Echo » (NRSE). Le spin du neutron n'y est plus soumis à des champs magnétiques constants produits par deux

gros aimants, mais on le fait résonner dans le champ radiofréquence de petites bobines, sur le principe de la résonance magnétique nucléaire. Dans cette nouvelle configuration, ce n'est pas le spin du neutron qui joue le rôle de l'horloge, mais le champ magnétique lui-même. L'avantage ? Quand on déplace le détecteur, les perturbations se trouvent fortement atténuées – et les mesures aux différents angles sont plus faciles à faire. Les bobines radiofréquences peuvent en outre être utilisées sur une plus large gamme de champs et de fréquences, ce qui étend d'autant la gamme des temps mesurables. Le champ magnétique devant être idéalement nul entre les bobines, on appelle aussi cette technique

« spectrométrie neutronique à champ nul ». Le premier appareil de ce type a été construit au Hahn-Meitner Institut de Berlin. Fin 1994, une équipe de l'Université technologique de Munich met en service un deuxième modèle sur l'aire expérimentale G1 bis d'Orphée, dans l'attente du démarrage du réacteur à haut flux FRM-II de Garching.

Cette installation de très haute performance bénéficie d'un guide à neutrons polarisant et d'un tout nouveau type de sélecteur de vitesse.

Le LLB se montrant particulièrement satisfait des performances de l'appareil, et du fait de décalages dans la mise en route de FRM-II, Muses (« Munich Spin Echo Spectrometer ») va finalement rester à Saclay. Il a été conçu comme un spin écho mixte, pouvant fonctionner soit en mode conventionnel, soit en mode résonnant. Les gammes de mesure  $\gamma$  sont de ce fait particulièrement étendues pour un flux neutronique d'une intensité remarquable, encore améliorée en 2003 suite aux travaux sur le canal 8F.



Le spectromètre  
G1 bis « Muses ».

fiabilité et la rapidité de mesures toujours plus subtiles. Comme le souligne un chercheur, « ce qui se faisait en une semaine il y a 25 ans se fait maintenant en 24 h ». Les manipulations sont de plus en plus délicates et nécessitent une instrumentation de très grande technicité : guidage du flux, sélection et préparation du faisceau incident, conditionnement de l'échantillon, détection et analyse automatique des résultats. Un programme d'évolutions instrumentales a été élaboré en 2005, en réponse à ces exigences. Fondé sur des problématiques scientifiques d'actualité (nouveaux matériaux, conditions extrêmes de pression et de température, interfaces, biologie, nanosciences et nanotechnologies), il comprend tant la jouvence et le renouvellement des spectromètres que le développement d'une instrumentation neutronique de haute performance : intégration des progrès récents de l'optique neutronique pour améliorer les flux neutroniques, acquisition d'une nouvelle génération de détecteurs, amélioration des microprocesseurs et des environnements échantillons. Ainsi le LLB se prépare-t-il à continuer à remplir sa triple mission de service, de recherche et de formation, tout en contribuant aux avancées de la recherche dans un nombre croissant de domaines : en physique bien sûr, mais aussi en chimie, métallurgie, biologie, médecine ou en pharmacie.



Aérogel de silice.

séparés par des régions de transition et variant en fonction de l'échelle.

Aux grandes distances, le système est homogène et continu ; les phonons de grande longueur d'onde peuvent s'y propager. À courte distance, l'aérogel est constitué de particules de silice vitreuse vibrant autour de leur point d'équilibre. C'est entre ces deux modes que se situe le régime de la fractalité. Les ondes de vibration, appelées « fractons », sont fortement localisées et se propagent difficilement, à la différence des phonons.

De nombreuses caractéristiques physiques des matériaux, comme les propriétés thermiques, optiques ou électroniques, découlent de ces modes de vibration. Le comportement des fractons peut ainsi être comparé au processus qui protège les arbres contre les rafales de vent : pour une fréquence donnée, seule une partie de la structure entre en résonance, ce qui limite fortement les oscillations de l'arbre entier. Cette caractéristique donne aux matériaux fractals des qualités d'isolant qui laissent envisager de fructueuses applications industrielles. Sans compter que les fractales sont très courantes dans la nature ! Le tout étant de bien connaître leurs propriétés...

#### UN EXEMPLE D'UTILISATION DE SPECTROMÈTRE À TEMPS DE VOL : L'ÉTUDE DES AÉROGELS DE SILICE SUR MIBEMOL

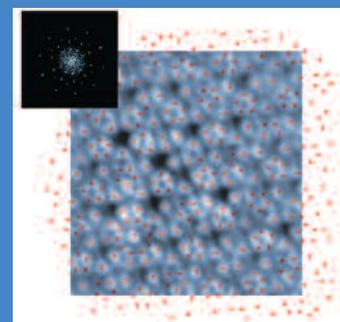
Le spectromètre à temps de vol G6-2 est construit entre 1981 et 1983 par une équipe du Centre nucléaire de Mol, sur financement belge. Après quelques difficultés de départ, « Mibemol » (comme réMI – du prénom de son responsable au LLB, Rémi Kahn – Belges de MOL) voit en 1987 son système de détection, ses programmes d'analyse des données et son environnement échantillon considérablement améliorés. Une campagne d'études expérimentales est lancée afin de mieux connaître la dimension spectrale des objets fractals.

On choisit comme échantillons des aérogels de silice, objets dont on connaît particulièrement bien la géométrie fractale. Les mesures, réalisées conjointement sur Mibemol et deux spectromètres de l'ILL, confirment avec éclat la validité de l'hypothèse théorique de départ : il existe en fait trois régimes de densités d'état,



#### LES QUASI-CRISTAUX

Jusqu'au milieu des années 1980, la plupart des cours de cristallographie commençaient par une définition du cristal, fondée sur la périodicité. Cette définition, associée à l'image du pavage de l'espace, excluait des réseaux cristallins certaines symétries, notamment celles d'ordre cinq : on ne peut pas paver le sol avec des pentagones ! De ce fait, les chercheurs qui, lors de l'étude des assemblages d'atomes, obtenaient des figures de symétrie cinq, suspectaient plutôt des artefacts qu'une caractéristique fondamentale des objets observés... Et les métallurgistes spécialisés dans les matériaux hypertexturés, grands utilisateurs de la microscopie électronique en mode diffraction, se sont longtemps interdit d'interpréter les clichés affligés d'une telle symétrie ! Lorsque, impressionnés par les nombreuses occurrences de ces diagrammes de diffraction, Dany Shechtman et ses collègues proposent, en 1984, leur interprétation du cristal non périodique, elle est accueillie avec scepticisme par la communauté des cristallographes. Cependant, devant la perfection et la finesse de plus en plus évidente des figures de diffraction obtenues, l'idée fait son chemin. Les objets présentant ces figures de diffraction sont désormais appelés « quasi-cristaux » et l'Union Internationale de Cristallographie finit par accepter, en 1991, une définition du cristal aperiodique.



Le premier pas dans l'interprétation des diagrammes de diffraction des quasi-cristaux a été fait par l'équipe de Dany Shechtman. Leur publication fondatrice s'intéressait, à l'aide d'une méthode de coupe d'un espace de dimension supérieure, aux positions des taches de diffraction ; cela permettait de dénombrer les atomes et de déterminer la symétrie de leurs positions. Une toute autre affaire est de caractériser leur nature et les déplacements compatibles avec cette symétrie. Le chantier n'est toujours pas clos : dans un modèle où les déplacements ne sont pas pris en compte (donc forcés à zéro), il reste encore à élucider la nature chimique d'environ un dixième des sites. Les premiers jalons de cette recherche ont été posés en 1988 par l'équipe de Denis Gratias grâce à la diffraction sur poudres de rayons X et de neutrons, réalisée au National Institute of Standards and Technology (NIST, États-Unis). Mais le LLB a lui aussi joué sa partie, le spectromètre pour monocristaux 5C2 ayant permis à la même équipe de valider, en 1991, un modèle plus élaboré.

Le LLB a par ailleurs contribué à une meilleure compréhension des mouvements si particuliers des atomes dans les quasi-cristaux. Ces derniers peuvent être considérés comme des cristaux de maille géante, contenant un très grand nombre d'atomes. Un tel système présente de nombreuses excitations différentes, chacune étant caractérisée par une branche de phonons à laquelle les neutrons sont sensibles. Ces branches sont si nombreuses qu'elles s'enchevêtrent et perdent rapidement leur individualité. Ces résultats ont été obtenus par diffusion inélastique de neutrons sur le spectromètre à 3 axes 4F2.

Image de microscopie électronique à balayage de  $7,8 \times 8,2 \text{ nm}^2$  d'une surface d'ordre 5 de l'alliage i-AlPdMn. La figure de diffraction associée montre la symétrie d'ordre 5. Les points rouges donnent la position des atomes selon le modèle Katz-Gratias.



## Les neutrons, à l'horizon de la recherche

Grâce à l'utilisation des neutrons produits par le réacteur Orphée, la communauté scientifique française et internationale a pu faire progresser la connaissance de la matière. Centrés dans les années 1970 sur la cristallographie et le magnétisme, les sujets traités à l'aide des neutrons se sont fortement diversifiés au fil des ans ; ils vont maintenant de la géologie aux sciences de la vie, en passant par l'histoire des arts. Cette évolution bénéfique est en grande partie due à la fructueuse collaboration engagée par le CEA et le CNRS avec la création du LLB autour du réacteur Orphée, ainsi qu'aux efforts quotidiens des scientifiques qui y travaillent. La mise en place de programmes de traitement de données, de structures d'accueil, de programmes de formation et d'un accompagnement scientifique des nouveaux venus a considérablement simplifié l'utilisation des installations.

Ainsi, en quelques années, le neutron est-il devenu d'une utilisation presque routinière dans tous les domaines de la recherche sur la matière. Autrefois confinée à quelques expériences phares, la diffusion neutronique a cessé d'être l'apanage d'une poignée de professionnels réputés disposant d'un outil exceptionnel ; elle fait partie de la panoplie de techniques dont dispose le scientifique pour explorer la matière. Tout chercheur souhaitant percer les secrets de celle-ci sait qu'il doit utiliser les neutrons parallèlement à d'autres outils, comme la résonance magnétique nucléaire, la diffraction de rayons X, la microscopie en champ proche ou la simulation numérique.

Dans le hall expérimental d'Orphée, les « trèfles » indiquent l'état des faisceaux de neutrons sur les appareils : en vert, le faisceau est fermé, en rouge, le faisceau est ouvert.



Les scientifiques du LLB veillent au bon fonctionnement de leur expérience.

S'il satisfait environ la moitié des besoins français en neutrons pour l'étude de la matière condensée, Orphée n'est pas le seul à nourrir une vaste communauté scientifique pour laquelle les frontières existent peu. Plus de vingt installations du même type existent dans le monde, dont huit dans l'Union Européenne, liées par un programme facilitant l'accès des utilisateurs aux différentes sources. Selon toute vraisemblance, les installations européennes les plus anciennes et les moins bien équipées fermeront bientôt leurs portes, les autres étant appelées à s'organiser en réseau autour d'une source majeure.

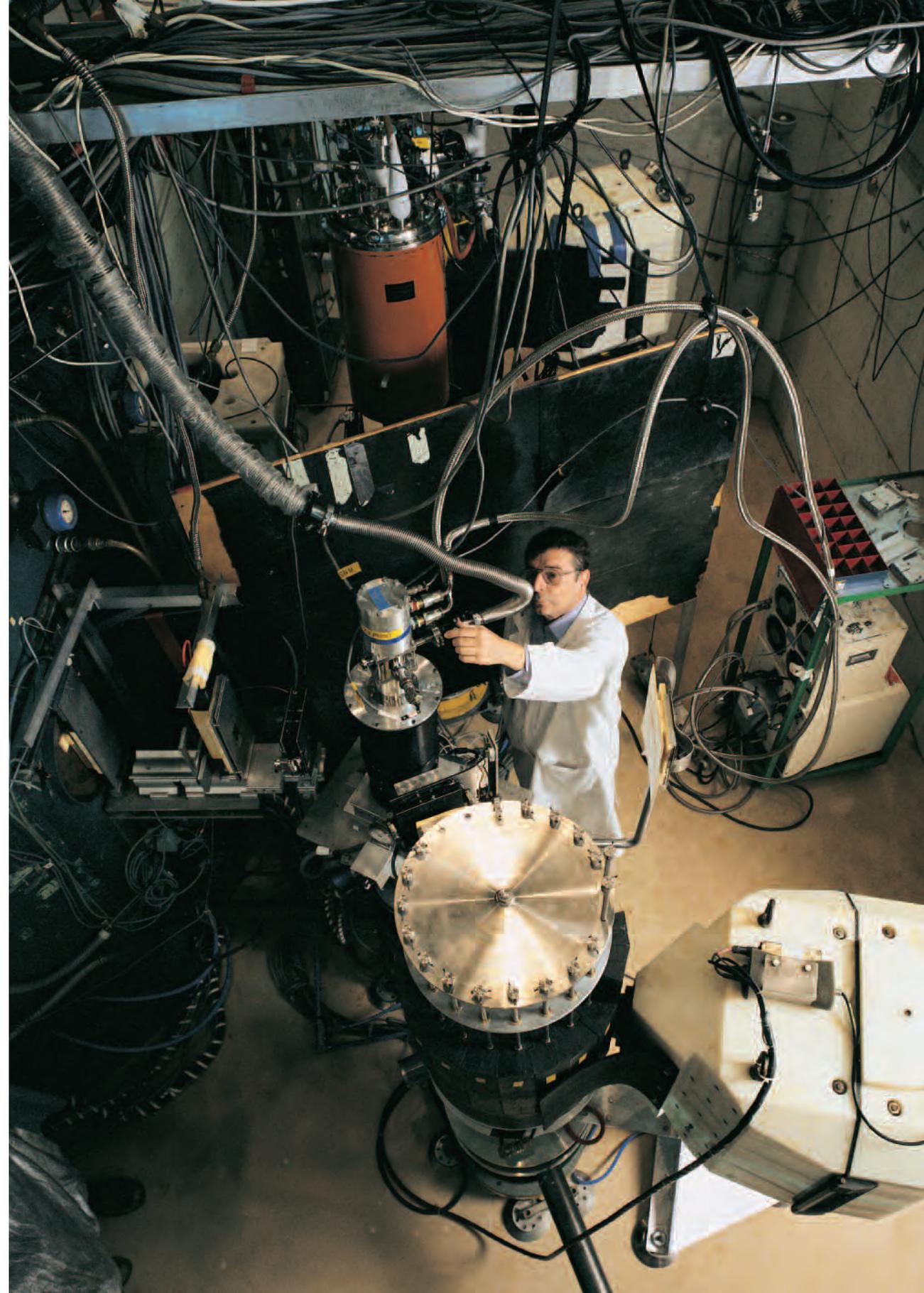
Orphée est en bonne place dans ce nouveau dispositif. L'installation bénéficie de bases de conception robustes, qui découlent d'une part des enseignements des premières sources de neutrons, et, d'autre part, de principes de sûreté contemporains de ceux des réacteurs de puissance déployés par EDF. Grâce aux choix initiaux de ses concepteurs, Orphée constitue une source compacte, fiable, performante et dont le coût d'exploitation reste très compétitif par rapport aux autres grands instruments scientifiques de ce type.

C'est une installation jeune, capable de s'adapter à l'évolution des technologies comme des besoins scientifiques ou industriels. Dès son origine, le contrôle non destructif par neutronographie, le dopage du silicium et la fabrication de radioéléments lui ont fourni des activités industrielles et commerciales complémentaires de ses activités scientifiques.

Les gestionnaires de l'installation ont visé à maintenir Orphée au premier plan de la technologie neutronique sans faire subir de profonds et coûteux remodelages au réacteur : tel est le bénéfice retiré de la conception, qui permet d'assurer la coexistence d'une partie expérimentale flexible et adaptable, et d'une partie réacteur robuste et pérenne.

Des améliorations significatives des capacités et des performances expérimentales ont ainsi pu être enregistrées sur l'installation sans modification de sa puissance d'origine. Résultat : le LLB a aujourd'hui équipé Orphée de presque tous les types de spectromètres, sur lesquels, grâce à des programmes de formation réguliers, de jeunes chercheurs apprennent le profit qu'ils peuvent tirer des propriétés de l'interaction neutrons/matière. Orphée leur permet de réaliser leurs travaux à l'instar de leurs aînés. Il les prépare également à utiliser d'autres sources européennes, parfois plus importantes, comme le Réacteur à Haut Flux de l'ILL à Grenoble, ou des sources à spallation – dont, demain peut être, la source ESS (European Spallation Source).

Les neutrons ne peuvent cependant résoudre à eux seuls tous les nouveaux défis que les chercheurs sont appelés à relever. Avec le synchrotron





1. Mise en place d'échantillons et derniers réglages avant l'ouverture du faisceau de neutrons.



Soleil, mis en service en 2006 à quelques centaines de mètres d'Orphée qui fournit des rayons X de très haute qualité, les scientifiques disposent de deux outils complémentaires très performants. Combinées, ces sources proposent deux visions complémentaires de la matière permettant de résoudre les problèmes les plus difficiles ; et les programmes scientifiques qui s'y développeront sont appelés à illustrer les liens étroits devant être tissés entre les deux



2. Le LLB accueille régulièrement des étudiants ; travaux pratiques, stages, thèses... Il organise tous les ans « Fan du LLB », une formation à la diffusion neutronique destinée aux chercheurs désireux de se familiariser avec cette technique.

3. Symbole d'un travail vers un objectif commun, les rencontres scientifiques de Saint-Aubin réunissent régulièrement les utilisateurs du LLB et de Soleil autour d'une thématique scientifique ciblée.

4. Discussions scientifiques au sein du groupe « théorie » du LLB.

installations. Au cœur du plateau de Saclay qui offre l'une des plus importantes concentrations géographiques d'universités, d'écoles et de centres de recherche sur le sol français, le pôle Orphée/Soleil sera ainsi le garant de la continuité d'une recherche performante de très grande qualité – et l'un de ses principaux atouts.



# Annexes

## Sources

Rapports d'activité du Laboratoire Léon Brillouin (collection complète)  
 Rapports d'activité du Commissariat à l'Énergie (collection complète)  
 Archives du CEA à Fontenay-aux-Roses  
 Archives du Laboratoire Léon Brillouin  
 Archives du réacteur Orphée (conception et exploitation)  
 Plaquettes de présentation du Laboratoire Léon Brillouin et du réacteur Orphée  
 Dépouillement des revues *Les échos du CEA* et *Phases Magazine*

## Orientations bibliographiques

- Abraham A.**, *De la physique avant toute chose ?* Paris, Odile Jacob, 2000.  
*Actes des colloques du 50<sup>e</sup> anniversaire du CEA.* Paris, CEA, 1997.
- Bacon G. E.** (ed.), *Fifty Years of Neutron Diffraction : The advent of neutron scattering.* Bristol, Adam Hilger, 1986.
- Barjon R.**, *Physique des réacteurs nucléaires.* Grenoble, Institut des Sciences Nucléaires, 1993.
- Bée M.**, *Quasi-elastic neutron scattering.* Bristol, Philadelphia, Adam Hilger, 1988.
- Bromberg J.**, « The impact of the neutron : Bohr and Heisenberg », *Historical Studies in the Physical Sciences* (3), 1971.
- De Gennes P.G.**, Badoz J., *Les objets fragiles.* Paris, Plon, 1994.
- Hoddeson L., Braun Erenest, Teichmann Jürgen,** Weart Spencer (eds), *Out of the Crystal Maze : Chapters from the History of Solid-State Physics,* New York, Oxford, Oxford University Press, 1992.
- Jacrot B.**, *Des neutrons pour la science : Histoire de l'Institut Laue-Langevin, une coopération internationale particulièrement réussie.* Les Ulis, EDP Sciences, 2006.
- Kröger B.**, « On the history of neutron », *Physis* (22), 1980.
- Krupchitski P.A.**, *Fundamental research with polarized slow neutrons.* Berlin, Springer-Verlag, 1987.
- Lecourt D.** (dir.), *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences,* Paris, PUF, 1999.
- Lefebvre V.**, *Au cœur de la matière : 50 ans de recherches au CEA de Saclay.* Paris, Le Cherche Midi, 2002.
- Lovesey S.W.**, *Theory of neutron scattering from condensed matter.* Oxford, Clarendon Press, 1984.
- Mosseri R.**, *Léon Brillouin, à la croisée des ondes.* Paris, Belin, 1999.
- Ne'eman Y.**, *Les chasseurs de particules,* Paris, Odile Jacob, 1999.
- Néel L.**, *Un siècle de physique.* Paris, Odile Jacob, 1991.
- Pestre D.**, *Physique et physiciens en France : 1918-1940.* Paris, Éditions des Archives contemporaines, 1984.
- Pullman B.**, *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine.* Paris, Fayard, 1995.
- Richter D., Springer T.**, *A twenty years forward look at neutron scattering facilities in the OECD countries and Russia.* OECD, novembre 1998.
- Schull C.G.**, « Early development of neutron scattering », Lecture Nobel, 8 décembre 1994.
- Sears V.F.**, *Neutron Optics,* New-York, Oxford University Press, 1989.
- Six J.**, *La découverte du neutron (1920-1936).* Paris, Éditions du CNRS, 1987.
- Weart S.**, « The Birth of the Solid-State Physics Community », *Physics Today* (41), July 1988.

# Crédits photographiques

**Couverture** : Jacques Boulay / CEA ; **page 8** : Philippe Stroppa / CEA ; **page 10** : Frank Lukasseck / Gettyimages® ; **page 12** : DR ; page 13hg : DR ; **page 13hd** : Schoenberg Center for Electronic Text & Images (SCETI) (University of Pennsylvania Library) ; **page 13bg** : Schoenberg Center for Electronic Text & Images (SCETI) (University of Pennsylvania Library) ; **page 13bd** : TopFoto / Roger-Viollet ; **page 14g** : Det Danske Filminstitut ; **page 14d** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 15h** : Laure Albin-Guillot / Roger-Viollet ; **page 15b** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 17** : Jacques Boyer / Roger-Viollet ; **page 18h** : Alain Menelle ; **page 18b** : Albert Harlingue / Roger-Viollet ; **page 19** : LLB ; **page 20** : Jacques Boulay / CEA ; **page 21h** : Schoenberg Center for Electronic Text & Images (SCETI) (University of Pennsylvania Library) ; **page 21b** : CEA ; **page 22** : LLB ; **page 23** : Boris Dänzer-Kantof ; **page 24** : Jacques Boulay / CEA ; **page 25** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 26** : Jacques Boulay / CEA ; **page 28** : L. Godart / CEA ; **page 29** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 30g et d** : Archives CEA © CEA ; **page 32** : Archives CEA © CEA ; **page 33h** : Archives CEA © CEA ; **page 33b** : Brookhaven National Laboratory ; **page 35** : CEA ; **page 36h** : LLB ; **page 36b** : ILL ; **page 37** : Archives Orphée © CEA ; **pages 38-39** : Archives Orphée © CEA et LLB ; **page 40h** : Archives Orphée © CEA ; **page 40bg** : LLB ; **page 40bd** : Archives Orphée © CEA ; **page 41h** : LLB ; **page 41b** : Archives CEA © CEA ; **page 42** : Archives Orphée © CEA ; **page 43** : Jacques Boulay / CEA ; **pages 44 à 47** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 48h** : Gonin / CEA ; **page 48b** : Jean Biaugeaud ; **pages 49g-49d** : Archives Orphée © CEA ; **pages 50-51** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 52** : CEA ; **page 53hg** : Jacques Boulay / CEA ; page 53hd : Arianespace / EADS ; **page 53b** : Archives Orphée © CEA ; **page 54** : Archives Orphée © CEA ; **page 55** : Jacques Boulay / CEA ; **page 57** : Archives Orphée © CEA ; **page 58bg** : Archives Orphée © CEA ; **page 58bd** : Soleil ; **page 59** : Jacques Boulay / CEA ; **pages 60-63** : Archives Orphée © CEA ; **page 64** : Jacques Boulay / CEA ; **page 66d** : AIP Emilio Segre Visual Archives, Léon Brillouin Collection ; **page 66g** : LLB ; **page 67** : Archives CEA © CEA ; **page 68** : Archives CEA © CEA ; **pages 69-70** : LLB ; **page 71h** : DR ; **page 71b** : Jean Biaugeaud / CEA ; **pages 72-73** : Jean Biaugeaud / CEA ; **page 75b** : Jacques Boulay / CEA ; **page 77h** : Jacques Boulay / CEA ; **page 77g-d** : CEA ; **page 78** : Louise Dautrey ; **page 79** : Jacques Boulay / CEA ; **page 80** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 81hd** : Jacques Boulay / CEA ; **page 81g** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 81bd** : LLB ; **page 82h** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 82bg** : LLB ; **page 82bd** : Jacques Boulay / CEA ; **page 84h** : Jacques Boulay / CEA ; **page 84b** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 85** : LLB ; **page 86** : Jacques Boulay / CEA ; **page 87** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 88h** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 88m** : Jacques Boulay / CEA ; **page 88b** : Patrick Robert/Syigma/CORBIS ; **page 89g** : Jacques Boulay / CEA ; **page 89d** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 90** : LLB ; **page 91** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA ; **page 92h** : Jacques Boulay / CEA ; **page 92b** : LLB ; **page 93** : Jacques Boulay / CEA ; **page 94** : Jean Biaugeaud / CEA ; **pages 96-97** : Jacques Boulay / CEA ; **page 98** : DR ; **page 99** : LLB ; **pages 100, 102-105** : Jacques Boulay / CEA ; **page 105h** : LLB ; **page 106-107** : Fabrice Blanchard (Imdk.com) / CEA.

# Remerciements

L'équipe de Public Histoire exprime sa gratitude à toutes les personnes qui ont apporté leur contribution à la réalisation de cet ouvrage, notamment : Paul Bréant, Daniel Cribier, Xavier Bravo, Didier Burdon, René Caudron, Grégory Chaboussant, Jérôme Estrade, Chantal Fuseau, Hervé Guyon, Bernard Hennion, Jean-Marc Joubert, Marianne Lambert, Philippe Mangin, Maurice Mazière, Hakima Mendil, Pierre Monceau, Fernande Moussa, Charles de Novion, Catherine Peleszezak, Alain Reynaud, Bernard Rieu et Delphine Vidart-Dufort.

Nous remercions également, pour leur participation à la recherche iconographique, Odile Frossard (archives CEA), Florence Klotz (Communication CEA), Laurence Koehler (Institut Laue Langevin) et Alain Menelle.

Nos remerciements vont également à tous le personnel de l'installation qui a apporté sa contribution à la réalisation de cet ouvrage et fait l'histoire d'Orphée et du LLB depuis leur origine.

Un grand merci, enfin, à Franck Pillot et Alain Menelle, qui ont piloté ce projet pour Orphée et le LLB.

Achévé d'imprimer en décembre 2008  
sur les presses de mccgraphics (Bilbao)  
Dépôt légal : décembre 2008



# Des neutrons pour explorer la matière

La recherche scientifique de haut niveau fait de plus en plus appel à des grands équipements permettant de voir et comprendre l'infiniment grand ou l'infiniment petit. Ce livre vous propose une plongée dans la vie d'un des grands outils de la recherche fondamentale française en physique : le réacteur nucléaire Orphée à Saclay.

Mis en service en 1980, le réacteur Orphée est une intense source de neutrons au service de la science et de l'industrie, pour l'étude de l'état condensé, la radiographie neutronique, le dopage du silicium, la fabrication de radioéléments pour la médecine, la mesure de traces par activation et la détermination des contraintes.

Autour du réacteur et de ses équipes, le Laboratoire Léon Brillouin et ses personnels CEA et CNRS développe des programmes de recherche fondamentale multidisciplinaires avec les instruments qu'il construit et qu'il met à la disposition de la communauté scientifique française et internationale.



Denis Mazzucchetti

# Des neutrons pour explorer la matière

Orphée,  
réacteur de recherche  
à Saclay