



S C I E N C E S & H I S T O I R E

DES NEUTRONS POUR LA SCIENCE

Bernard Jacrot

HISTOIRE DE
L'INSTITUT LAUE-LANGEVIN,
UNE COOPÉRATION INTERNATIONALE
PARTICULIÈREMENT RÉUSSIE.

EDP
SCIENCE

Des neutrons pour la science

Histoire de l'Institut Laue-Langevin, une coopération internationale particulièrement réussie

Bernard Jacrot



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

« Sciences & Histoires »

La collection Sciences & Histoires s'adresse à un public curieux de sciences. Sous la forme d'un récit ou d'une biographie, chaque volume propose un bilan des progrès d'un champ scientifique, durant une période donnée. Les sciences sont mises en perspective, à travers l'histoire des avancées théoriques et techniques et l'histoire des personnages qui en sont les initiateurs.

Déjà paru :

Léon Foucault, par William Tobin, adaptation française de James Lequeux, 2002

La physique du XX^e siècle, par Michel Paty, 2003

Jacques Hadamard. Un mathématicien universel, par Vladimir Maz'ya et Tatiana Shaposhnikova, 2004. Traduit de l'anglais par Gérard Tronel

L'Univers dévoilé, par James Lequeux, 2005

Pionniers de la radiothérapie, par Jean-Pierre Camilleri et Jean Coursaget, 2005

Charles Beaudouin. Une histoire d'instruments scientifiques, par Denis Beaudouin, 2005

Conception de la couverture : Éric Sault – Crédit photos : réacteur © ILL/Baudet ; statues © ILL/Artechnique ; poster © ILL/Briq

Courriel de l'auteur : b.jacrot@wanadoo.fr

ISBN : 2-86883-878-2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© 2006 EDP Sciences

*Je dédie ce livre à tous les jeunes chercheurs,
ingénieurs et techniciens, allemands,
britanniques et français qui ont contribué,
par leur enthousiasme,
à faire de l'ILL une réalité.*

À Grenoble, un emploi sur six est lié à la recherche. Quant aux projets structurants portés par les grands laboratoires et équipements de recherche internationaux comme l'ILL, ils contribuent incontestablement à la dynamique de notre ville, à son essor économique et social.

En évoquant cette réussite du pôle grenoblois, on a souvent coutume de parler de modèle de développement à la grenobloise. Basé sur le tryptique enseignement-recherche-industrie, ce modèle remonte à l'après-guerre et au rôle déterminant joué par quelques personnalités pionnières comme Louis Néel.

Visionnaire, Louis Néel a largement contribué à bâtir le pôle scientifique grenoblois, en prônant le regroupement des grands laboratoires et équipements européens sur un même lieu, le polygone scientifique, ancien polygone d'artillerie, situé à proximité du centre de Grenoble. Ce fut l'installation du Centre d'Études Nucléaires (CENG), puis, grâce aux relations étroites qui liaient Louis Néel et Maier-Leibnitz au sein du bureau de l'union internationale de physique pure et appliquée, l'implantation de l'ILL, et plus tard, de l'ESRF.

Aujourd'hui, grâce à cet environnement exceptionnel, qui permet une synergie exceptionnelle entre tous les organismes de recherche mais aussi le développement de partenariats renforcés entre recherche et industrie, Grenoble s'est imposée comme un pôle de compétitivité mondialement reconnu aussi bien dans le domaine des micro-nanotechnologies et des logiciels que dans celui de la biologie, et notamment de la biologie moléculaire et structurale.

Fruit d'un partenariat entre 11 pays, aujourd'hui à la tête de la recherche neutronique mondiale et porteur de projets structurants menés en partenariat avec les autres acteurs du pôle grenoblois (ESRF, IBS autour du partenariat pour la biologie structurale mais aussi avec les grands instituts de recherche européens comme le CERN, l'ESA, l'ESO) l'ILL est un formidable exemple de coopération scientifique réussie entre pays européens. En cela, il reflète cette politique qui a toujours animé le développement du pôle d'innovation grenoblois à savoir le travail en réseau, essentiel pour relever les défis de la recherche de demain, qui vont bien au-delà de la seule capacité et du seul enjeu national.

Exemplaire, l'ILL est bien un acteur clé du développement du pôle d'innovation grenoblois et du rayonnement scientifique de toute une région, de tout un pays.

Merci à Bernard Jacrot, premier directeur français de l'ILL, de nous permettre de revivre cette histoire, qui s'écrit au passé, au présent et au futur.

Michel DESTOT
Député-Maire de Grenoble

Préface

C'est pour moi un grand plaisir de saluer un texte qui donne un point de vue circonstancié de l'histoire de l'Institut Laue-Langevin de Grenoble. Grenoble a été appelée la vitrine des alpes Françaises et l'ILL est certainement dans un site remarquable. Les premiers faisceaux de neutrons y ont été produits il y a presque 35 ans et l'Institut fut créé il y a 40 ans. Très rapidement l'ILL, spécifiquement construit pour mettre un instrument à la disposition des usagers, devint le modèle reconnu de fonctionnement de tels instruments et très vite, il fut clair que la science utilisant les neutrons avait été mise au premier plan grâce aux innovations dans lesquelles s'étaient courageusement embarqués les directeurs de l'époque et les Associés. De nos jours, cette position a été maintenue et l'esprit d'innovation et l'ambition sont toujours bien vivants. L'ILL maintenant, en collaboration avec le conseil scientifique et la communauté des usagers, fait des plans pour optimiser le haut niveau des instruments scientifiques pour les vingt prochaines années ou plus.

Bernard Jacrot fut, à l'origine, un des directeurs de l'Institut en poste avec deux éminents directeurs allemands, Heinz Maier-Leibnitz et Rudolf Mössbauer, aujourd'hui des figures mythiques et très justement respectés. Bernard Jacrot quitta l'ILL à la fin de son contrat et passa alors un certain temps à Cambridge dans le centre renommé de biologie moléculaire ; il revint plus tard à l'ILL comme « senior scientist » déterminé à introduire la biologie aux neutrons et les neutrons à la biologie. L'énormité de la tâche ne l'a pas dissuadé et les bases mises en place dans ces disciplines scientifiques sont maintenant bien visibles avec l'ouverture du bâtiment Carl-Ivar Branden qui regroupe trois laboratoires européens et deux laboratoires nationaux qui mettent en commun leur expertise en biologie pour faire le meilleur usage des neutrons et du rayonnement synchrotron à l'ILL et dans le laboratoire voisin de l'ESRF.

J'ai eu du plaisir à lire ce livre tel qu'il a été écrit. Cela m'a permis de combler des trous dans mes souvenirs de l'ILL. L'ILL est une véritable réussite non seulement pour la science européenne mais aussi pour l'intégration européenne. C'est un emblème dont l'Europe peut être fière et dont, je l'espère, elle pourra s'enorgueillir encore longtemps.

C.J. CARLILE
Directeur de l'ILL
Traduction de B. JACROT

Preface

It gives me great pleasure to salute the writing of this personal view of the history of the Institut Laue-Langevin in Grenoble. Grenoble has been called the French Alpine showcase and ILL certainly sits in remarkable surroundings. Neutron beams were first produced here almost 35 years ago and the Institute was founded 40 years ago. Very quickly the ILL, as a dedicated purpose-built user facility, became the accepted model for the operation of user facilities, and within a short time it was clear that neutron science in Europe had been placed in a leading position thanks to the innovations which had been bravely embarked upon by the then Directors and Associates. It still remains there today, and the spirit of innovation and ambition is alive and well. ILL is today, advised by the Scientific Council and large user community laying down plans to optimise its high quality scientific output for the next twenty years or more.

Bernard Jacrot was one of the original Directors of the Institute serving with two eminent German Directors, Heinz Maier-Leibnitz and Rudolf Mössbauer, mythical figures today and rightly well respected. Bernard Jacrot left the ILL when his Directorship concluded and spent time in the renowned centre for molecular biology in Cambridge, but he then returned to the ILL as a senior scientist determined to introduce biology to neutrons, and neutrons to biology. The enormity of that task did not deter him, and his foundations in this scientific disciplines are now visibly being built upon with the opening of the Carl-Ivar Branden building which groups together three European Laboratories and two National Laboratories pooling their biological expertise to better use the neutron and synchrotron radiation instruments at the ILL and its neighbouring laboratory, the European Synchrotron Radiation Facility.

I have enjoyed reading this book as it has been written. It has allowed me to fill in many gaps in my recollections of the ILL. ILL has been a real achievement not only for European Science, but also for European integration. It is an emblem of which Europe can be proud, and long may it remain so.

C.J. CARLILE
ILL Director

Vorwort

Mit großer Freude begrüße ich, dass die Geschichte des Grenobler Instituts Laue Langevin aus dieser persönlichen Sicht geschrieben wurde. Grenoble wird die Vitrine der französischen Alpen genannt, und das ILL liegt zweifellos in einer außergewöhnlichen Umgebung. Das Institut wurde vor 40 Jahren gegründet, und vor fast 35 Jahren wurden dort zum ersten Mal Neutronenstrahlen erzeugt. Sehr schnell wurde das als zweckbestimmte Nutzereinrichtung konzipierte ILL zum allgemein anerkannten Modell für den Betrieb solcher Institutionen, und in kurzer Zeit stand fest, dass dank mutiger Innovationen durch die damaligen Direktoren und Gesellschafter die Neutronenstreuung in Europa in eine Vorrangstellung gerückt war. Dies trifft auch heute noch zu, und auch die Unternehmungslust und Ehrgeiz sind gesund und munter geblieben. In Zusammenarbeit mit seinem Wissenschaftlichen Rat und seiner großen Nutzergemeinschaft arbeitet das ILL heute an Plänen, die seine erstklassigen Experimentiereinrichtungen für die kommenden 20 Jahren und darüber hinaus optimieren sollen.

Bernard Jacrot war einer der Gründungsdirektoren des Instituts und gleichzeitig mit zwei eminenten deutschen Direktoren, nämlich Heinz Maier-Leibnitz und Rudolf Mößbauer, heute mythischen und zu Recht hochgeachteten Persönlichkeiten, im Amt. Nach Beendigung seiner Amtszeit verließ Bernard Jacrot das ILL und arbeitete eine Zeit lang am berühmten Laboratorium für Molekularbiologie in Cambridge, kam aber dann als Senior Wissenschaftler wieder ans ILL zurück, entschlossen, Neutronen in die Biologie, und Biologie in die Neutronen einzuführen. Die Ungeheuerlichkeit dieser Aufgabe schreckte ihn nicht ab, und auf den von ihm in dieser Disziplin gelegten Fundamenten wird heute mit der Eröffnung des Carl-Ivar-Brändén-Gebäudes sichtbar aufgebaut. Darin vereinigen drei europäische und zwei nationale Laboratorien ihre biologische Kompetenz, um die Neutronen- und Röntgenstrahlung am ILL und seinem Nachbarinstitut, der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF, besser zu nutzen.

Ich habe es genossen, dieses Buch zu lesen, während es geschrieben wurde. Es hat mir erlaubt, viele meiner Erinnerungslücken im Zusammenhang mit dem ILL zu füllen. Das ILL war eine echte Errungenschaft nicht nur für die europäische Forschung, sondern auch für die europäische Integration. Es ist ein Symbol, auf das Europa stolz sein kann, und möge es noch lange so bleiben.

C.J. CARLILE

ILL-Direktor

Traduction relue et corrigée par Roland MAY

Sommaire

Préface	vii
Avant-propos	xv
1 Préhistoire	1
2 Portrait des trois principaux artisans de la création de l'ILL	17
3 Pourquoi investir tant d'argent dans une source de neutrons ?	33
4 Négociations	47
5 Construction du réacteur et constitution des équipes scientifiques	61
6 Début de la recherche avec le réacteur et arrivée des Britanniques	95
7 Maturité	105
8 Années noires (1991-1995)	119
9 Consolidation et avenir	127
Conclusion	131
Remerciements	139
Chronologie	141
Liste des principales personnes impliquées dans l'histoire de l'ILL	143

Annexes	149
Index des noms propres	163
Index des noms communs	165

Avant-propos

L'Institut Laue-Langevin, ou plus exactement, suivant son nom officiel, l'Institut Max von Laue-Paul Langevin (ILL) est l'un des premiers exemples d'une coopération scientifique pleinement réussie entre des pays européens. Il n'est précédé que par le CERN (Organisation européenne pour la Recherche nucléaire) et par l'Euratom dont les histoires remontent aux premières années suivant la dernière guerre mondiale. L'histoire du CERN, créé en 1953, a été décrite dans un gros ouvrage en trois volumes¹. L'Euratom fut établi par le traité de Rome de 1957. À ma connaissance, son histoire n'a pas été écrite, du fait peut-être du succès mitigé de cet organisme. L'ILL, à la différence du CERN, à la création duquel les scientifiques américains ont grandement participé, fut à l'origine un projet et une réalisation purement franco-allemands. *A priori* une telle coopération entre deux pays qui s'étaient tellement combattus n'était pas évidente, d'autant plus que cet institut devait être installé dans une région de France qui avait été un haut lieu de la résistance (le Vercors). Le nom du lieu même d'implantation de l'ILL (avenue des Martyrs) en porte témoignage. Comment cela a été possible est l'un des thèmes de ce livre. À une époque où se développe un certain scepticisme sur l'Europe, il me paraît utile de montrer comment une coopération qui est progressivement devenue européenne (il y a maintenant dix pays impliqués et le nombre continue de croître) permet de faire bien mieux que ce que pourraient faire des pays repliés sur eux-mêmes.

Comme ce livre essayera de le montrer, l'ILL est une réussite qui a permis à l'Europe de surpasser les États-Unis dans un domaine de recherche important grâce à un outil spécifique, un réacteur neutronique à haut flux, qui demeure encore à ce jour inégalé. Il me paraît important de comprendre ce qui a permis cette réussite.

La préhistoire de l'ILL remonte à plus de quarante ans. Une grande partie des acteurs de la lente gestation qui a conduit à la construction de l'Institut et de son réacteur ne sont donc plus de ce monde. Mais il en reste suffisamment (en particulier l'auteur). Bien entendu, ils sont tous à la retraite. Leurs témoignages peuvent encore être recueillis mais il faut faire assez vite pour obtenir une histoire qui puisse en tenir compte. Cela dit, ce livre est l'œuvre d'un scientifique qui n'a aucune formation d'historien et qui a découvert progressivement les difficultés de ce nouveau métier. La traque de la vérité, si elle est aussi importante en histoire qu'en physique, fait appel à de tout autres méthodes. On découvre la nécessité de recouper les témoignages, ce qui n'est pas toujours possible lorsque les témoins se font rares. Le travail fut encore compliqué par l'absence presque totale d'archives à l'ILL (et au Centre d'études nucléaires de Grenoble). Il n'existe même pas une collection complète des rapports d'activité de l'ILL. En effet, ce n'est pas

¹ HERMANN A., History of CERN, 1987, North-Holland Physics Pub.

un réflexe naturel que de constituer des archives dès la création d'un institut. Heureusement il me restait mes archives personnelles, dont une partie a été retrouvée dans un placard de l'ILL. Cette histoire ne peut donc pas être totalement objective. Dans un livre, paru alors qu'une première version de mon texte était terminée (*La traversée des frontières*, Paris, 2004), l'helléniste et philosophe Jean-Pierre Vernant analyse les problèmes qui se posent à celui qui écrit l'histoire des événements récents. Il conclut qu'il n'est possible de le faire que si l'on prend en compte le caractère subjectif de tous les témoignages, même s'ils sont parfaitement honnêtes. J'ai essayé de faire au mieux.

Je n'ai plus aucune responsabilité à l'ILL depuis plus de trois décennies et je suis à la retraite depuis plus de dix ans. Je me suis donc senti libre de dire toute la vérité, même si, dans de rares cas, elle n'est peut-être pas politiquement correcte. Il viendra un temps où de vrais professionnels reprendront ce travail et exploreront des archives que je n'ai pas su trouver. Ils devront s'en contenter car il ne restera plus de témoins de la création de l'ILL. J'ajouterai que la rédaction de ce livre m'a procuré une grande satisfaction, car il est toujours plaisant de repenser à une entreprise qui fut un succès et à laquelle on est fier d'avoir contribué.

La construction d'un institut scientifique est une entreprise humaine avec tout ce que cela peut impliquer comme conflits entre les divers acteurs. Cela veut aussi dire que la personnalité et, éventuellement, le charisme de certains peuvent jouer un rôle fondamental. Pour une entreprise scientifique, ce charisme comporte nécessairement une importante composante reposant sur la crédibilité scientifique. J'essaierai de mettre en valeur cet aspect humain dans l'histoire de l'ILL. En particulier, je tenterai de brosser le portrait de trois des principaux acteurs de cette histoire, trois fortes personnalités, Jules Horowitz, Louis Néel et Maier-Leibnitz, malheureusement disparus tous les trois. Ce livre ne devrait donc pas ressembler à un classique compte rendu de réunion scientifique dans lequel on ne donne que les conclusions des débats en gommant toutes les discussions qui ont permis d'arriver à ces conclusions. De tels comptes rendus quand ils existent sont cependant essentiels car ils fournissent le cadre dans lequel peut s'insérer l'aspect humain qui, lui, ne repose que sur les souvenirs des témoins encore vivants.

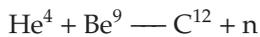
L'ILL étant un institut scientifique, il n'est pas possible d'en parler sans un minimum d'explications sur les recherches qui y sont entreprises. Comme ces recherches portent sur un grand nombre de domaines scientifiques, allant de la physique nucléaire à la biologie, j'essaierai de faire comprendre aux non-spécialistes l'objet du travail et ses résultats.

Les textes en italique reproduisent sans aucune modification des documents ou des parties de documents utilisés.

Chapitre 1

Préhistoire

Le neutron fut découvert en 1932 par Chadwick. Particule neutre de masse très proche de celle du proton, c'est l'un des deux constituants du noyau atomique. Cette particule est produite lors de certaines réactions nucléaires. La première réaction utilisée, en particulier celle qui a permis la découverte du neutron, est la collision entre des particules alpha et un noyau de béryllium :



C'est cette réaction qui, pendant les premières années, servit à fabriquer des sources de neutrons. L'un des résultats obtenus grâce à cette source fut la découverte, en 1939, par Hahn et Strassman, de la fission des noyaux d'uranium induite par la capture d'un neutron. Rapidement, on observa que cette fission, au cours de laquelle de l'énergie était libérée, s'accompagnait de l'émission d'environ deux neutrons, ce qui rendait *a priori* possible une réaction en chaîne. L'énergie dégagée trouve son origine dans la perte de masse au cours de la fission. Cette masse perdue m est transformée en énergie E suivant la relation d'Einstein :

$$E = mc^2$$

dans laquelle c est la vitesse de la lumière.

Une telle réaction permettait de concevoir une nouvelle source d'énergie. La première réalisation concrète d'une telle réaction fut effectuée en 1942 aux États-Unis, à Chicago, par Enrico Fermi et son équipe. À cette époque, les États-Unis étaient entrés en guerre et travaillaient à la mise au point de la bombe atomique, autre façon plus brutale de mettre en œuvre cette même réaction en chaîne. Tout ce travail, y compris celui de Fermi, fut donc réalisé, sous le nom de code « *Manhattan Project* », dans le plus grand secret.

Les neutrons qui accompagnent la fission ont des énergies de l'ordre de 1 million d'électrons-volts (MeV) ; mais il fut rapidement compris que, lors d'un choc élastique de ces particules avec les noyaux d'atomes, principalement ceux de faible poids

moléculaire, le neutron perdait de l'énergie. Après plusieurs collisions, les neutrons forment une sorte de gaz en équilibre thermique avec le milieu dans lequel ils se trouvent. Ces neutrons sont alors dits *thermiques*. La réaction en chaîne est principalement entretenue par ces neutrons thermiques beaucoup plus favorables pour induire une fission. Il en résulte que la plupart des réacteurs nucléaires comportent un modérateur, matériau léger et n'absorbant pas les neutrons (graphite très pur, eau lourde, eau légère) disposé autour et entre les barres d'uranium. Pour construire le premier réacteur, Fermi utilisa du graphite.

Les neutrons ont une longueur d'onde de Broglie, λ , reliée à leur vitesse v et donc à leur énergie par la relation :

$$\lambda = h/mv$$

Dans cette formule, h est la constante de Planck, m la masse du neutron et v sa vitesse. Les neutrons rapides ont les plus petites longueurs d'onde, de l'ordre de la dimension du noyau. En revanche, les neutrons thermiques ont des longueurs d'onde de l'ordre de l'angström, c'est-à-dire comparables aux distances interatomiques. Avec les neutrons thermiques, il est alors possible, comme avec les rayons X, d'observer la diffraction des neutrons. Ceci fut compris dès 1936 et publié par W. M. Elsasser (théorie). H. von Halban et P. Preiswerk en apportèrent la même année une preuve expérimentale qui fut immédiatement confirmée par D. P. Mitchell et P. N. Powers. Ces trois articles sont reproduits dans le livre de George Bacon, *Fifty years of neutron diffraction* (1987). À la même époque, une autre découverte donna un grand intérêt à la diffraction des neutrons : Felix Bloch, physicien américain, prédit¹ que le neutron devait posséder un moment magnétique. Cette prédiction fut rapidement confirmée expérimentalement par Hoffman *et al.*² Ceci avait comme conséquence que les neutrons interagissaient avec le moment magnétique des atomes et pouvaient donc être utilisés pour déterminer des structures magnétiques. C'était un avantage considérable des neutrons comparés aux rayons X. Mais les flux de neutrons produits par une source radium béryllium étaient beaucoup trop faibles pour réaliser ce type d'études.

Tout changea avec la mise en route, à Oak Ridge aux États-Unis dans le Tennessee, en novembre 1943, du premier

¹ BLOCH F., On the magnetic scattering of neutron, 1936 Phys. Rev., 50, 259.

² HOFFMAN J.G., LIVINGSTON M.S., BETHE H.A., 1936, Phys. Rev., 51, 214-215.

réacteur expérimental (alors encore appelé pile car consistant en un *empilement* de blocs de graphite dans lequel étaient insérées des barres d'uranium) relativement puissant (3,5 mégawatts) produisant, dans son centre, un flux de neutrons d'environ 10^{12} neutrons/cm²/sec. Le but premier de ce réacteur était de produire le plutonium requis pour la fabrication de l'arme atomique. Pendant la guerre, un spectromètre fut installé auprès de lui pour mesurer les sections efficaces d'interaction des neutrons avec divers noyaux atomiques dont la connaissance était elle aussi nécessaire à la construction de la bombe atomique. Mais après la guerre un diffractomètre à deux axes³ fut construit par E. Wollan, permettant d'enregistrer des images de diffraction. En juin 1946, Cliff Shull vint rejoindre Ernest Wollan. En 1949, C. G. Shull et J. S. Smart démontrèrent⁴ qu'à la température de l'azote liquide, les moments magnétiques des atomes de manganèse dans le MnO sont distribués en deux sous-réseaux avec des orientations opposées de leurs moments magnétiques. Une telle organisation avait été prédite quelques années auparavant par Louis Néel. Ce travail valut à Cliff Shull le prix Nobel de physique en 1994. Ce nouveau type d'arrangement magnétique qui avait été baptisé « antiferromagnétique » par Bitter et la température en dessous de laquelle ce nouveau type d'ordre apparaissait fut dénommé par Gorter « température de Néel ».

Tout ce travail démontrait l'utilité des neutrons pour étudier la physique du solide, en particulier celle des substances magnétiques. Mais il apparaissait absolument nécessaire de pouvoir disposer de flux de neutrons plus importants que ceux qui étaient produits par le réacteur d'Oak Ridge. Les premiers pas pour trouver une solution à ce problème furent faits à Brookhaven, sous l'impulsion de Donald Hughes. Ce physicien, qui était responsable à Brookhaven de la recherche utilisant les neutrons, publia en 1953 un livre intitulé *Pile neutron research*. Ce livre fut aussitôt la bible des jeunes chercheurs qui, comme moi, s'engagèrent alors dans ce domaine. C'est en 1954 qu'il attira l'attention du directeur de Brookhaven sur la nécessité de doter le centre d'un réacteur produisant un flux plus élevé que celui produit par la pile à graphite existant alors à Brookhaven. Les étapes qui suivirent sont décrites très soigneusement dans la contribution de Larry Passel (*High flux at*

³ Le premier axe est celui qui porte un monocristal qui sert à sélectionner des neutrons monochromatiques, le second axe est celui qui porte l'échantillon à analyser.

⁴ SHULL C.G., SMART J.S., 1949, Phys. Rev., 76, 1256-1257.

Brookhaven) au livre, déjà cité, édité par George Bacon. Le point important, dû à Jack Chernick, dans la conception de ce réacteur fut d'imaginer un réacteur avec un cœur sous-modéré à l'eau lourde entouré par un réflecteur d'eau lourde. Ceci permet d'avoir le maximum du flux de neutrons thermiques dans ce réflecteur, à quelques dizaines de centimètres du cœur. Dès lors on pouvait utiliser, pour laisser sortir les neutrons, des canaux tangentiels visant cette zone. Ceci permet de minimiser le bruit de fond créé par les neutrons épithermiques et rapides et par le rayonnement gamma qui proviennent directement du cœur du réacteur. Cette disposition sera tout naturellement reprise pour le réacteur de l'ILL. La conception détaillée du réacteur de Brookhaven et sa construction furent réalisées sous la responsabilité d'Herbert Kouts que nous retrouverons à propos du réacteur de l'ILL. La construction fut achevée en 1965.

Bien évidemment, l'Europe qui ne put débiter des recherches utilisant des neutrons qu'après la fin de la guerre avait de ce fait un retard de plusieurs années sur les États-Unis. La Grande-Bretagne, dont de nombreux scientifiques avaient participé pendant la guerre aux travaux réalisés outre-Atlantique, fut la première à disposer d'un réacteur (GLEEP) dès le mois d'août 1947, suivi un an après par BEPO, un réacteur plus puissant permettant de réaliser des expériences de diffraction de neutrons.

Je parlerai uniquement de la situation en Allemagne et en France, les deux pays qui fondèrent l'ILL, mais il ne faut pas pour autant oublier les autres pays. La Hollande et la Norvège eurent à Kjeller, en Norvège, un réacteur commun dès 1951, le Danemark eut le sien en 1962. En Italie, les chercheurs eurent à leur disposition une source nationale en 1957, puis une autre à Ispra dans le centre de recherche de l'Euratom. La Suède et l'Inde eurent chacun leur réacteur. En Pologne, un réacteur fut inauguré en 1958. Avant cela, l'URSS disposa de plusieurs sources et un centre de recherche international, regroupant les pays de l'Est fut créé à Dubna, à environ 100 km de Moscou, dans lequel furent construites des piles pulsées (la première dès 1960). La Suède et l'Inde eurent chacune un réacteur à la même époque. Dans les années 1950-1960, il existait de fréquentes rencontres entre les utilisateurs de ces divers réacteurs, surtout entre ceux de l'Europe de l'Ouest.

La France, comme la Grande-Bretagne, confia toute la recherche sur le nucléaire civil et militaire à un organisme spécialisé, créé pour la circonstance, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). À sa création, il était dirigé par Frédéric Joliot

qui, avec ses collaborateurs Halban et Kowarski (fig. 1.1), avait déposé, avant la guerre, plusieurs brevets sur l'utilisation, tant civile que militaire, de la fission. La France suivit de près la Grande-Bretagne avec, en 1948, la mise en route de ZOE, réacteur de très basse puissance comme GLEEP, mais utilisant l'eau lourde plutôt que le graphite comme modérateur. Ce choix a plusieurs explications. La première est que la seule usine qui, en Norvège, fabriquait dès avant-guerre de l'eau lourde était à capitaux français et que tout le stock mondial qui y avait été fabriqué, soit 165 litres, avait été emmené en France au début de la guerre, puis transporté outre-Atlantique par Halban et Kowarski avant l'invasion allemande. C'est tout naturellement que l'équipe française (Frédéric Joliot, Lew Kowarski et Hans von Halban⁵) privilégia alors ce matériau dans ses réflexions et ses expériences sur la possibilité de réaliser une réaction en chaîne. Ensuite, le réacteur ZOE doit certainement beaucoup à Lew Kowarski (1907-1987) qui le conçut et en dirigea la construction. L. Kowarski avait eu, pendant la guerre, la même responsabilité pour le premier réacteur canadien qui lui aussi utilisait l'eau lourde comme modérateur. Enfin, une pile à eau lourde demande environ dix fois moins d'uranium qu'une pile utilisant du graphite. Or, à cette époque, la France ne possédait aucun uranium sous forme métallique et dut utiliser de l'oxyde d'uranium. C'est ainsi que le CEA fut amené à mettre au point, pour la première fois au monde, un combustible céramique. Ce premier réacteur fut construit à Fontenay-aux-Roses, dans la proche banlieue de Paris.

En 1952, le CEA créa un nouveau site, dédié à la recherche civile, sur le plateau de Saclay à proximité de ce qui sera plus tard l'université d'Orsay. Sur ce site, les chercheurs français disposèrent bientôt d'un autre réacteur à eau lourde (EL2) plus puissant, permettant de disposer d'un flux de 10^{12} neutrons/cm²/sec. La construction de ce réacteur fut également réalisée sous la direction de Kowarski. Le flux permit de réaliser des expériences, principalement de physique nucléaire (mesures de sections efficaces) mais aussi de diffraction,



Figure 1.1. Lew Kowarski en 1945.

⁵ Il est intéressant de noter que cette équipe française comprenait un russe et un autrichien. La science est internationale. C'est un point essentiel qu'il ne faut pas oublier et qui fait toute la force de la science américaine. L'arme atomique n'a pu être réalisée par les États-Unis pendant la guerre que parce que ce pays avait su accueillir les savants européens chassés d'Europe (Fermi, Szilard, Einstein, etc.).

puis de spectrométrie⁶, en utilisant la diffusion inélastique des neutrons.

Il était évident que les flux, tant de BEPO que d'EL2, étaient encore insuffisants pour de très nombreuses expériences. Avant d'envisager la construction de réacteurs à haut flux, une idée fut introduite puis mise en pratique sur BEPO, en Angleterre, par Peter Egelstaff⁷. Pour de nombreuses expériences, en particulier de spectroscopie, il est préférable d'utiliser des neutrons de grande longueur d'onde (donc de faible énergie), 4 Å ou plus. Or il est, en principe, facile d'augmenter le flux de ces neutrons. Pour cela, il suffit d'introduire une certaine quantité d'hydrogène liquide au fond d'un canal. Dans ce milieu, les neutrons se thermalisent à une température de 20 K, augmentant de ce fait leurs longueurs d'onde. Le groupe de Saclay (Daniel Cribier et Bernard Jacrot), impressionné par ces résultats, se lança dans la construction d'une source froide destinée au nouveau réacteur (EL3) en construction à Saclay. Ce travail fut effectué en étroite collaboration avec le laboratoire de basse température de Grenoble, dirigé alors par Louis Weil, en particulier avec Albert Lacaze. La source froide, qui fonctionna à partir de 1959, consistait en un mélange d'hydrogène et de deutérium liquide, ce qui permettait d'avoir un plus grand volume pour cette source. Je dois dire que j'ai souvent rencontré Peter Egelstaff durant cette construction et que j'ai trouvé auprès de lui une aide constante qui fut d'une grande utilité. Pour nous faire gagner du temps, nos rencontres avaient souvent lieu dans l'un des aérodromes de Londres ou de Paris. Plus tard, des sources froides furent également installées dans les réacteurs allemands de Karlsruhe et de Jülich.

En 1956, un nouveau site du CEA dénommé Centre d'étude nucléaire de Grenoble (CENG), fut créé à Grenoble. Louis Néel, qui avait bien compris l'intérêt des neutrons, en particulier pour les études de structures magnétiques, et qui souhaitait développer dans l'Institut polytechnique de Grenoble une section de génie atomique, était à l'origine de cette implantation. Il fut d'ailleurs le premier directeur du CENG. Dès 1958, un premier réacteur, Mélusine, de 1 MW à l'origine, y est en fonctionnement. Il est suivi par Siloé en 1963. La puissance de 35 MW permet de l'utiliser pour des études de structures atomiques et magnétiques. Félix Bertaut (fig. 1.2), responsable



Figure 1.2. Félix Bertaut en 1973.

⁶ JACROT B., C.R. Acad. Sci., 1955, 240, p. 745-747.

⁷ BUTTERWORTH I., EGELSTAFF P.A., LONDON H., WEBB F.J., Phil. Mag., 1957, 2, p. 917.

d'un laboratoire de cristallographie du CNRS, s'occupa avec succès de ces études. Cette forte imbrication du CENG avec les laboratoires du CNRS et avec l'université caractérise l'originalité du site de Grenoble et le différencie de Saclay. Cette imbrication était amplifiée par le fait que Louis Néel était alors directeur à la fois du laboratoire du CNRS sur le magnétisme (auquel était rattaché le laboratoire de Bertaut), de l'Institut national polytechnique de Grenoble (INPG), et du CENG.

En **Allemagne**, un projet d'arme atomique avait été amorcé pendant la guerre. Les premiers essais de construction d'un réacteur échouèrent alors⁸. Finalement le projet fut abandonné au profit du développement des fusées V1 et V2. Après la guerre, tout travail impliquant l'énergie nucléaire fut interdit aux chercheurs allemands. Les physiciens durent attendre 1955 pour que cet interdit soit levé et pour qu'ils disposent, à Garching près de Munich, d'un réacteur, acheté tout fait aux États-Unis, qui fut opérationnel en 1957. Ce réacteur, dirigé par le professeur Maier-Leibnitz, n'avait à l'origine que 1 MW de puissance, mais était rattaché à l'université technique de Munich à la différence de ce qui se passait en Grande-Bretagne et en France où les réacteurs étaient implantés dans des sites du CEA, ou de son équivalent anglais, et étaient donc complètement coupés de l'université (sauf à Grenoble au CENG). La faible puissance de ce réacteur limitait le type d'expériences réalisables et Maier-Leibnitz privilégia les développements méthodologiques. Parmi ces derniers, il en est un qui a reçu beaucoup d'applications depuis : ce fut l'invention des guides de neutrons (l'analogue pour les neutrons des fibres optiques pour la lumière), qui grâce à la réflexion totale permettent de conduire, avec très peu de pertes, les neutrons à plusieurs mètres, voire à des dizaines de mètres du réacteur.

Quelques années plus tard, des instituts de recherche plus proches de ce qu'était en France le CEA furent créés à Jülich et à Karlsruhe et disposèrent de réacteurs plus puissants que celui de Garching. Le réacteur de Karlsruhe, premier réacteur de conception et de réalisation allemande, fut critique en mars 1961 et atteignit la puissance de 12 MW en décembre 1962. Celui de Jülich, très similaire au réacteur anglais BEPO, fonctionna à partir de fin 1962. Il eut d'abord une puissance de 10 MW, qui fut poussée à 15 puis à 23 MW au cours des dix années suivantes. Sous la direction de Tasso Springer, de Stiller et de Schmatz qui avaient été formés à Munich, un groupe très

⁸ Le graphite utilisé n'était pas assez pur et l'Allemagne ne disposait pas d'eau lourde.

United States Government Printing Office: Washington, D.C. 20540-4500. Order by mail from the Superintendent of Documents, P.O. Box 37, Springfield, VA 22161-0037.

LES NOUVELLES TENDANCES DANS LA RECHERCHE ATOMIQUE
ET LEUR SIGNIFICATION INTERNATIONALE

par

L. Kowarski
 Conseiller Scientifique
 de l'Agence Européenne pour l'Energie Nucléaire

Fr. rev.

Avant-Propos

Chapitre I. NOUVELLES TACHES DES CENTRES DE RECHERCHE ATOMIQUE

1. Introduction
2. Applications des connaissances atomiques d'aujourd'hui
3. Nécessité de nouveaux progrès des connaissances atomiques
4. Avenir des centres de recherche atomique
5. Une définition de la recherche atomique semi-appliquée

Chapitre II. LE CADRE DE L'ACTION INTERNATIONALE

1. Buts et formes de la coopération
2. Quelques aspects internationaux de la recherche semi-appliquée

Chapitre III. LES DOMAINES DE RECHERCHE SE PRETANT A LA COOPERATION

1. Réacteurs et études à haut flux p. 21
2. Traitement des données
3. Physique des réacteurs
4. Conversion directe
5. Réacteurs de puissance d'avant-garde
6. Recherches sur les matériaux et les composants

- 3 -

Figure 1.3. Première mention d'un réacteur européen à haut flux dans un rapport de L. Kowarski.

actif développa de nombreuses applications des neutrons à la physique de la matière condensée.

Telle était la situation au moment où aux États-Unis, à Brookhaven, était mise en route la construction du HFBR (*High Flux Beam Reactor*) qui allait mettre les chercheurs européens en état d'infériorité vis-à-vis de leurs collègues américains. La première mention d'un réacteur européen à haut flux que j'ai trouvée est dans un rapport⁹ rédigé en avril 1961 par Lew Kowarski, intitulé « Les nouvelles tendances dans la recherche atomique et leur signification internationale » (fig. 1.3). À cette époque, Lew Kowarski était déjà au CERN

⁹ Ce rapport ainsi que ceux cités un peu plus loin sont dans les archives de Lew Kowarski déposées au *Center for History of Physics* de l'*American Institute of Physics*, que je remercie pour m'avoir fourni des copies de ces documents.

mais conservait un grand intérêt pour un domaine, celui des réacteurs nucléaires, qu'il avait largement contribué à créer. Il était d'ailleurs conseiller scientifique de l'agence européenne pour l'énergie nucléaire.

Dans son rapport, il insiste sur la nécessité d'une coopération européenne analogue à celle du CERN pour réaliser un instrument comparable à ceux fonctionnant ou devant bientôt fonctionner aux États-Unis. C'est au titre de conseiller scientifique qu'il participa le 25 octobre 1961 à une réunion organisée dans le cadre de l'Organisation pour la Coopération Économique et le Développement (OCDE¹⁰). Cette réunion avait pour but d'examiner les propositions formulées dans le rapport de Kowarski et traitait de « la coopération dans certains secteurs de la recherche nucléaire » ; l'idée d'un réacteur haut flux européen, évoquée dans le rapport cité plus haut, y fut pour la première fois discutée. Le représentant britannique (M. Vick¹¹) mentionna qu'une étude d'un réacteur à eau lourde de 25 MW, destiné essentiellement aux recherches sur la physique de l'état solide, était en cours dans son pays. Une telle initiative n'avait rien de surprenant : nos collègues britanniques étaient certainement les plus avancés, en tous cas en Europe, dans ce domaine d'application des neutrons, grâce à des chercheurs comme Peter Egelstaff, Ray Lowde, John White, Bill Mitchell, etc. Comme représentants de l'Allemagne, Maier-Leibnitz et Joachim Pretsch, directeur au ministère allemand de la recherche, participaient à cette réunion dans laquelle fut décidée la réunion d'un comité d'experts choisis parmi les utilisateurs éventuels du réacteur à haut flux envisagé.

L'étude britannique fut poursuivie et un groupe d'ingénieurs fit dès 1962, c'est-à-dire avant le démarrage du réacteur de Brookhaven, une proposition concrète pour un HFBR à construire à Harwell¹² (site, voisin d'Oxford, d'un important laboratoire de l'énergie atomique du Royaume-Uni). Ce document présente trois options : la première est une copie pure et simple du réacteur en construction à Brookhaven. La deuxième option est une légère modification de ce réacteur

¹⁰ Cette première organisation européenne fut créée en 1948 (sous le nom d'Organisation européenne de coopération économique, OEEC) pour assurer la gestion des fonds du plan Marshall d'aide américaine à la reconstruction de l'Europe.

¹¹ Je pense qu'il s'agissait de Sir Arthur Vick (1911-1998) qui a travaillé à Harwell à partir de 1959.

¹² CROCKER V.S., HALLIDAY D.B., WADE B.O., JACKSON E.M., FORGAN R., High Flux Beam reactor Report, AERE M (1962) 1123.

pour y inclure une source froide ainsi qu'une source chaude pour maximaliser localement, respectivement le flux des neutrons de grandes et courtes longueurs d'onde. Pour ces deux options, on comptait sur le fait que Brookhaven enverrait à Harwell tous ses plans. La troisième option, qui est la plus développée dans ce rapport, est celle d'un réacteur de conception britannique pour lequel des études complémentaires seraient nécessaires. Pour ce dernier choix, l'investissement est évalué à 6,76 millions de livres sterling (équivalent à environ 130 millions d'euros de 2004) et le temps d'étude et de construction est estimé à 63 mois. Une source froide et une source chaude y sont prévues. La source froide est conçue pour utiliser de l'hydrogène liquide (170 g) ce qui limite ses possibilités par rapport à une source utilisant du deutérium liquide, comme cela a été fait à l'ILL. Il apparaît que ce choix était délibéré, de façon à diminuer le volume de la source froide pour minimiser l'échauffement de la source froide par le rayonnement issu du cœur du réacteur. Dans le projet, il est même envisagé de réduire encore plus ce volume. La lecture de ce document, qui n'a pour auteurs que des ingénieurs, révèle un manque de dialogue approfondi entre ces derniers et les futurs utilisateurs.

Le comité d'experts se réunit plusieurs fois en 1962 pour étudier plusieurs variantes de réacteurs à très haut flux. Ce comité était présidé par Kowarski et était composé de physiciens utilisateurs de neutrons venant des différents pays européens participant à l'OCDE ; il comprenait entre autres l'anglais Peter Egelstaff, Hans Maier-Leibnitz et moi-même. Il travaillait sur la base du projet britannique (encore que je n'ai pas souvenir que le gros document, de 160 pages et 60 illustrations, qui le décrit ait été distribué aux participants) avec l'idée d'en faire un projet européen. Les discussions de ce groupe de travail, dont je n'ai pu retrouver aucun compte rendu, furent certainement utiles car pour la première fois des physiciens de divers pays, qui certes parfois se connaissaient un peu pour s'être déjà rencontrés dans des congrès, eurent à travailler ensemble ou en tous cas à envisager une vie scientifique commune. De fait, les discussions entre chercheurs se passèrent très bien et démontrèrent qu'il existait en Europe une importante communauté qui souhaitait avoir à sa disposition un réacteur à haut flux. Malheureusement des problèmes budgétaires (ou peut-être politiques ; c'est à la même époque que la Grande-Bretagne bouda le Marché commun) conduisirent les Britanniques à se retirer d'un projet qu'ils avaient initié et qui de ce fait tomba à l'eau.

De cet échec est né l'ILL comme projet franco-allemand. En effet, la première réaction de Jules Horowitz fut de dire qu'il fallait que les Français élaborent leur propre projet et qu'ils recherchent des partenaires qui accepteraient de participer à sa réalisation. Horowitz était alors chef du service de physique mathématique au CEA, service qui devait prioritairement s'occuper de la physique des réacteurs. Il demanda à Robert Dautray (fig. 1.4), alors ingénieur dans son service, d'élaborer un tel projet. Maier-Leibnitz évoque dans le livre de A. L. Edingshaus¹³ et dans une discussion qu'il eut en juillet 1982¹⁴ avec Tasso Springer sur l'histoire de l'ILL, une conversation qu'il eut à cette époque (à une date non précisée) avec M. Baissas. Ce dernier était alors chef de cabinet de Francis Perrin, le haut-commissaire du CEA. Au cours de cette conversation, Baissas lui exprima son regret au sujet de la mort du projet européen et suggéra que ce projet soit repris comme une collaboration franco-allemande avec une réalisation éventuelle à Grenoble. À cette époque, les pouvoirs du haut-commissaire étaient limités, la vraie tête du CEA étant l'administrateur général. Je pense que Baissas informait ainsi Maier-Leibnitz des discussions qui avaient alors lieu entre les dirigeants du CEA.

De son côté Louis Néel, dans son livre de souvenir, *Un siècle de physique*, ne mentionne absolument pas les réunions dans le cadre de l'OCDE, auxquelles, si mes souvenirs sont exacts¹⁵, ne participa aucun Grenoblois, mais évoque son action auprès des dirigeants du CEA et du CNRS pour obtenir un réacteur à haut flux à Grenoble. C'est aussi à cette époque (vers la fin 1963) que Maier-Leibnitz rendit pour la première fois visite à Louis Néel, qu'il ne connaissait pas encore. Ce dernier lui dit son intérêt pour les réacteurs à haut flux. Mais il me semble que le geste essentiel fut celui d'Horowitz demandant à Dautray d'entreprendre l'étude d'un projet de réacteur, faisant ainsi passer les discussions du stade de la spéculation à celui de projet concret.

Les neutroniciens et physiciens grenoblois manifestèrent leur propre intérêt pour un tel projet et ceci pour plusieurs raisons. La première était qu'un tel réacteur devrait absolument comporter une source froide de haute performance



Figure 1.4. Robert Dautray (entouré par Jean Charvolin et Jean-Paul Martin. Photo prise au cours des travaux de reconstruction).

¹³ Heins Maier-Leibnitz. *Ein halbes Jahrhundert Experimentelle Physik*, Souvenirs collectés par Annez-Lydia Edingshaus. Munich 1986.

¹⁴ Discussion qui fut enregistrée et transcrite, et que Tasso Springer m'a communiquée.

¹⁵ Les participants possibles auraient été Ageron et Bertaut, tous deux décédés.

et que le savoir-faire existait à Grenoble, grâce à Louis Weil et Albert Lacaze qui avaient construit, pour et avec nous, la source froide de Saclay. La deuxième était qu'il existait à Grenoble une expérience dans la réalisation d'une pile piscine, qui *a priori* était une alternative au modèle de Brookhaven. Ensuite Bertaut était, bien entendu, intéressé pour ses études de diffraction par un accès facile à une source intense de neutrons ; la dernière raison était le souhait clairement formulé par le CENG, en particulier par son directeur Louis Néel pour qu'un tel réacteur soit implanté à Grenoble. Ceci conduisit à la rédaction d'un projet intitulé « Un réacteur à haut flux et faisceaux sortis » qui fut présenté à la conférence de Genève sur les applications pacifiques de l'énergie atomique de 1964. L'auteur principal de ce projet était Paul Ageron avec la collaboration de Denielou, Dautray, Fournier, Jacrot, Perroud, Lacaze et Weil. Ce projet associait ainsi physiciens, constructeurs de réacteurs, et spécialistes des basses températures de Grenoble et de Saclay. Le réacteur décrit très sommairement dans cette communication était donc du type pile piscine. Il ne retenait du réacteur de Brookhaven que le concept essentiel de cœur sous-modéré et l'utilisation d'uranium très enrichi.

Les réacteurs de type piscine sont des réacteurs dans lesquels le cœur en uranium enrichi¹⁶, refroidi par de l'eau ordinaire, est immergé dans une piscine. Cette eau a alors un triple rôle : elle contribue à la thermalisation des neutrons et au refroidissement du cœur ; et elle participe à la protection contre le rayonnement qu'il émet. Ce type de réacteur développé aux États-Unis depuis 1950 avait été mis en démonstration lors d'une précédente conférence de Genève en 1955. Le réacteur Siloe de Grenoble avait été construit selon ces principes. Le projet de réacteur présenté à Genève, par Robert Dautray, était aussi de ce type mais en y incorporant un réflecteur d'eau lourde. Jules Horowitz avait lui-même déposé avec Victor Raievski un brevet de pile piscine, dont certains éléments seront repris dans le projet du réacteur à haut flux (RHF).

À cette conférence de Genève assistait Maier-Leibnitz, qui avait participé aux réunions de l'OCDE à Paris. Il fut aussitôt séduit par le projet et par sa réalisation éventuelle à Grenoble. Il en parla à Joachim Pretsch, directeur au ministère allemand

¹⁶ Dans l'uranium naturel il n'y a que 0,7 % d'uranium 235 qui est le seul qui soit fissile. Dans l'uranium enrichi ce pourcentage est accru par diverses méthodes physiques (centrifugation, diffusion en phase gazeuse). Il est dit très enrichi quand ce pourcentage dépasse 90 %. C'est aussi cet uranium très enrichi qui est utilisé dans la fabrication des bombes atomiques.

de la recherche, lui aussi présent à Genève ; Maier-Leibnitz, dans sa discussion avec Springer, évoque le désir de faire plaisir aux Français alors « très désagréables au sein de la communauté »¹⁷. Pretsch en parla au ministre Lenz lui-même. Ce dernier eut aussi une conversation avec Horowitz auquel il donna le nom de Maier-Leibnitz comme interlocuteur. De premières discussions entre Horowitz et Maier-Leibnitz s'ensuivirent. Lenz avait des rapports cordiaux avec son collègue français Palewski. Or à cette époque, l'idée de coopération franco-allemande initiée en avril 1963 par de Gaulle et Adenauer manquait de réalisations concrètes. Le projet de la construction d'un gros instrument de recherche dans ce cadre bilatéral fut donc politiquement très bien accueilli. Les deux ministres concernés, allemand et français, donnèrent donc un accord de principe à la réalisation d'une source intense de neutrons à construire à Grenoble dans le cadre d'une coopération franco-allemande. À ce moment là je participais à Nottingham en Angleterre à une conférence sur le magnétisme. C'est là que la rumeur concernant l'accord passé à Genève m'atteignit.

Il me paraît important de souligner que si le contexte politique a favorisé la décision de construire le RHF et l'ILL, les motivations qui poussèrent l'OCDE, puis la France et finalement le couple franco-allemand à proposer cette construction étaient d'ordre purement scientifiques. Les relations cordiales et même souvent amicales entre Maier-Leibnitz et ses collègues allemands d'une part et Néel, Horowitz, Dautray et moi-même d'autre part facilitèrent certainement l'élaboration du projet.

Horowitz, qui participa à la conférence de Genève et discuta du projet avec Maier-Leibnitz, fut satisfait de voir ses idées, qui avaient conduit à la présentation du projet, être sur le point de se concrétiser, même s'il eut certainement préféré que la réalisation en soit faite à Saclay.

À la même époque un autre groupe de physiciens étudiait la possibilité de réaliser une pile pulsée européenne. Dans un réacteur comme ceux dont nous venons de parler, de la matière fissile et un ralentisseur (eau légère, eau lourde ou graphite) sont assemblés de façon à constituer un ensemble critique¹⁸ dans lequel se déroule la réaction en chaîne. Cette réaction est contrôlée par l'introduction de matière absorbant

¹⁷ C'est en effet le 1^{er} juillet de cette année 1965 que de Gaulle ouvrit « la crise de la chaise vide » en refusant que la France siège dans les instances communautaires. Il trouvait l'Europe trop fédérale.

¹⁸ Voir le chapitre suivant pour la définition de masse critique.

les neutrons (cadmium, bore) de façon à avoir un ensemble stable qui produit un flux constant de neutrons. Mais on peut aussi utiliser un ensemble sous-critique qui ne devient critique que transitoirement par l'introduction momentanée d'un supplément de matière fissile ou d'un supplément de réflecteur. On a alors un réacteur pulsé. Ceci a été réalisé pour la première fois (1960) en URSS dans le cadre du *Joint Institute of Nuclear Research* (JINR) avec IBR-1. L'intérêt de cette technique est que, avec une puissance moyenne modeste, on peut avoir un flux de neutrons important durant chacun des courts moments où le réacteur est critique. Le projet européen dont je parle ici, nommé SORA, a été élaboré dans le cadre de l'Euratom par une équipe dirigée par W. Kley. Avec une puissance moyenne de 1 MW et une puissance au pic de 300 MW, il était prévu un flux maximum de $4,10^{15}$ neutrons/cm²/sec. Comme nous le verrons plus loin, il existe des techniques qui permettent d'utiliser au mieux ce flux de pointe. Il y avait donc dans ce projet quelque chose de séduisant.

L'Euratom, créé en 1957, avait deux objectifs principaux : veiller à la non-prolifération des armements nucléaires et travailler à la création en Europe d'une industrie nucléaire civile. Ces deux thèmes étaient donc essentiellement techniques et politiques. Cependant, Euratom décida de créer un centre commun de recherches consacré, au moins partiellement, à la recherche fondamentale. Le site d'Ispra en Italie du Nord fut choisi pour y implanter ce centre de recherche. C'est dans ce cadre que fut élaboré le projet SORA, projet typique de recherche fondamentale. Ce projet n'a jamais été réalisé, mais à l'époque il suscita un grand intérêt dans la communauté scientifique concernée et rendit nécessaire une réflexion sur les mérites comparés d'un réacteur à haut flux et d'un réacteur pulsé. Cette comparaison était rendue difficile par le fait que nous n'avions en Europe occidentale aucune expérience d'une pile pulsée. Je me rendis donc à Dubna en novembre 1964 pour une visite d'une dizaine de jours. Mes conclusions furent les suivantes :

Le domaine d'application d'une pile pulsée du type SORA est plus limité que celui d'une pile atomique statique à haut flux. Mais pour certaines expériences ses possibilités sont plus grandes. C'est le cas en physique nucléaire. En diffusion inélastique des neutrons froids et pour une partie des expériences de diffraction, la pile pulsée donnera de meilleurs résultats que la pile statique. Un autre aspect important est que la pile statique avec un flux de 10^{15} est à la limite des possibilités techniques et qu'aucune amélioration n'est à attendre. Il n'en

est pas de même avec une pile pulsée. Des progrès importants peuvent être réalisés. . . Il semble donc que le projet SORA a un intérêt considérable.

Maier-Leibnitz partageait cet avis et il avait une grande estime pour W. Kley fortement impliqué dans le projet SORA. Mais il fallait choisir et la méfiance de Jules Horowitz vis-à-vis de l'Euratom, et l'absence, tant en France qu'en Allemagne, de l'expertise sur les piles pulsées condamnait le projet SORA¹⁹.

La validité du concept de pile pulsée sera pourtant démontrée un peu plus tard par la mise en service à Dubna, en 1984, du réacteur pulsée IBR 2. Sa conception et ses performances sont très proches de celles prévues pour SORA. Toutefois, le réacteur statique de l'ILL prouvera amplement la fiabilité et l'efficacité de cette approche alors qu'un réacteur pulsé aurait été à la fois plus fragile, moins sûr, plus difficile à défendre face à la montée de la sensibilité antinucléaire de la fin des années 1970. D'autre part la technologie des sources pulsées est partie sur d'autres voies plus prometteuses, comme les sources à spallation²⁰ ou les réacteurs pulsés couplés à un accélérateur.

Avec le recul, le choix d'un réacteur à haut flux statique optimisé pour la production de faisceaux de neutrons intenses était donc certainement le bon choix pour l'époque. En revanche, la génération de sources de neutrons destinées à venir après l'ILL ne sera certainement pas constituée de réacteurs statiques, avec lesquels il serait très difficile sinon impossible de faire beaucoup mieux que le réacteur de l'ILL.

Nous en avons maintenant fini avec la préhistoire et il est temps de regarder comment l'accord verbal de Genève s'est concrétisé. Mais avant il me paraît utile de regarder de plus près à quoi peuvent servir les faisceaux de neutrons. L'expérience de Shull et Wollan mentionnée plus haut fut réalisée à l'aide d'un faisceau de neutrons issu d'un réacteur qui n'avait pas été construit spécialement pour cela. Le projet franco-allemand était celui d'un réacteur construit

¹⁹ Contrairement à ce que dit Louis Néel page 216 dans son livre de souvenirs *Un siècle de physique*, Horowitz n'a jamais soutenu le projet SORA. Il est douteux qu'il ait pu « prédire une déconfiture complète au réacteur grenoblois », puisque le projet en avait été élaboré par Robert Dautray, l'un de ses meilleurs collaborateurs.

²⁰ Elles ne reposent plus sur la réaction nucléaire de fission, comme les réacteurs nucléaires, mais sur la réaction de spallation. Autrement dit, un puissant accélérateur bombarde avec des protons de haute énergie une cible en métal lourd qui émet alors un flux pulsé de neutrons rapides.

uniquement pour produire des faisceaux de neutrons, d'un coût (traduit en monnaie de 2005) d'environ 300 millions d'euros. Il fallait donc que la justification d'une telle dépense repose sur un dossier scientifique sérieux. Ce sera le thème d'un autre chapitre que le lecteur non scientifique pourra sauter.

Chapitre 2

Portrait des trois principaux artisans de la création de l'ILL

La création d'un institut comme l'ILL est le résultat du travail et de l'engagement de nombreux acteurs. Une partie d'entre eux est répertoriée dans une annexe. Comme je l'ai déjà écrit, trois hommes ont eu un rôle essentiel dans la création de l'ILL : Jules Horowitz, Hans Maier-Leibnitz et Louis Néel. Ils sont tous les trois décédés. Je vais essayer de brosser un portrait sommaire de chacun d'eux. Au cours de leur vie, ils ont tous les trois joué un rôle allant bien au-delà de celui qui fut le leur à l'ILL. Horowitz est à l'origine du développement du nucléaire français et de l'indépendance énergétique nationale qui en résulte. Par ailleurs, il a contribué à faire du CEA un agent majeur dans la recherche fondamentale française. Louis Néel a fait de Grenoble un pôle national et international de la recherche fondamentale et appliquée. Maier-Leibnitz a réintroduit la physique allemande comme un agent majeur, comme elle l'avait été jusqu'en 1933. Tous trois ont su s'imposer dans leurs pays, grâce à leur travail et à leur intelligence, comme des personnalités incontournables dont les possibilités d'action furent considérables. C'étaient incontestablement des hommes de pouvoir. Ils étaient parfaitement conscients de leur intelligence, mais n'ont jamais été arrogants. L'arrogance est une manifestation des faibles et de ceux qui n'ont pas confiance en eux. Un autre point commun à ces trois hommes était leur rigueur, tant intellectuelle que morale. Cela dit, ils possédaient chacun leur propre personnalité que je vais essayer de dégager.



Figure 2.1. Jules Horowitz.

Jules Horowitz (1921-1995)¹

Le rôle de Jules Horowitz dans la création de l'ILL est considérable. C'est lui qui, après l'échec du projet européen initié par Kowarski, a poussé les équipes du CEA à reprendre un projet sur une base purement française. Au départ, seuls les chercheurs et ingénieurs de Saclay furent impliqués ; mais rapidement les équipes du CENG travaillèrent avec celles de Saclay pour aboutir à la présentation à Genève de la communication d'Ageron *et al.* sur « un réacteur à haut flux et faisceaux sortis ».

Si Horowitz n'est pas signataire de cette communication, il en fut largement l'inspirateur. En effet, ce projet portait sur un réacteur destiné uniquement à produire des faisceaux de neutrons sortis en excluant donc son utilisation pour faire des irradiations. Or Horowitz a toujours été un partisan de la séparation de ces deux utilisations des neutrons, en faisant appel à deux réacteurs différents pour les satisfaire. Le réacteur de l'ILL est resté fidèle à ce principe en n'ayant que quelques dispositifs d'irradiation n'interférant pas avec la production des faisceaux. Cette caractéristique du réacteur a d'ailleurs posé problème lors des discussions avec les Britanniques au sujet de leur adhésion à l'ILL. En effet, le projet britannique tentait de prendre en compte ces deux aspects avec le même réacteur.

Durant toute l'élaboration de l'avant-projet, puis du projet et pendant la construction du réacteur, Horowitz a suivi les travaux de très près. Il avait *a priori* confiance en ceux qu'il avait choisis pour être sur le terrain, en l'occurrence Robert Dautray puis Jean Chatoux et moi-même. Mais il tenait à être tenu, au jour le jour, au courant de ce qui se passait, se fâchant si on négligeait de le faire. Il a toujours été respecté et admiré par tous ceux qui ont eu à travailler avec lui. Il fut toujours assidu aux réunions du comité de direction jusqu'en 1987. En dehors de la période de création de l'ILL, son rôle fut particulièrement important au moment des négociations avec le SRC. Il a toujours maintenu une bonne atmosphère tout en étant très ferme sur le fond, exprimant clairement son hostilité à un accès de l'ILL hors d'une participation du SRC comme partenaire. Il s'est attiré l'estime des négociateurs britanniques. Bill Mitchell qui, nous le disons par ailleurs, était le plus fort soutien du

¹ Je m'appuie pour ce texte sur les communications faites lors des journées d'hommage de 1996, sur le livre publié en 1999 par le CEA sur « l'œuvre de Jules Horowitz » et sur des souvenirs personnels.

réacteur britannique, lui a rendu hommage tant pour son intelligence et ses compétences scientifiques que pour son art de la négociation. Horowitz a su convaincre les associés de financer, en 1979, un second souffle pour que l'ILL puisse garder sa position d'avant-garde.

Né en Pologne en 1921, Jules Horowitz ou plutôt Jules, comme tout le monde l'appelait, émigra avec sa famille en 1926 en Allemagne. Il y acquit une bonne connaissance de la langue et de la culture du pays. L'antisémitisme, qui avait été à l'origine de cette première émigration de la Pologne en Allemagne, les amena en France vers 1932. Son père était un universitaire spécialiste de l'Ancien Testament. Jeune, brillant, Jules est reçu à l'école polytechnique en 1941. Mais l'entrée à l'école lui est interdite par les lois raciales. Il avait aussi été reçu à l'école des mines de Saint-Étienne qui l'accepta. Mais après un premier trimestre, les autorités de Vichy imposèrent son renvoi. Horowitz partit à Lyon où il suivit les cours de licence de physique et eut à emprunter des livres à la bibliothèque du lycée du Parc. Une rafle lui imposa de se cacher loin de Lyon jusqu'à la libération². Il échappa ainsi que son père aux rafles anti-juives. Mais sa mère fut arrêtée par la police de Vichy et déportée à Auschwitz où elle fut assassinée. Il dut attendre la libération pour suivre les cours de l'école, d'abord comme élève étranger jusqu'à sa naturalisation en novembre 1945 (naturalisation trop tardive pour qu'il puisse entrer dans le prestigieux corps des mines, auquel son classement lui donnait accès).

Après la guerre et à sa sortie de l'école, en 1946, il entra au CEA. Son premier travail fut d'établir les éléments de calcul de piles (pour aider à la construction de ZOE) à partir des notes rapportées d'Amérique par Kowarski³. L'année suivante, il partit se former à la physique théorique au Danemark chez Niels Bohr. À son retour, il fut affecté au service de physique mathématique, alors dirigé par Jacques Yvon. Les chercheurs de ce service (Anatole Abragam, Michel Trocherie puis Albert Messiah, Claude Bloch et quelques autres) partageaient leur temps entre la physique théorique à proprement parler et la

² Les livres disparurent dans l'aventure. Le lycée du Parc a porté plainte et Horowitz fut condamné pour vol de livres par un tribunal de l'époque. À la libération, il se retrouva avec cette condamnation que le ministère de la Justice de cette nouvelle époque refusa d'annuler. Je tiens ces faits de Robert Dautray que je remercie. Ils illustrent bien l'ambiguïté de l'attitude des autorités françaises de l'époque vis-à-vis des juifs.

³ Souvenirs de Jules Horowitz publiés dans le numéro spécial des Échos du CEA pour les vingt ans de ZOE.

physique des réacteurs ; le travail théorique d'Horowitz portait sur des sujets très variés. En 1949, il rédige avec Albert Messiah une importante mise au point sur le passage des neutrons à travers les milieux cristallins⁴. Je n'ai malheureusement pas pu trouver le texte de cette mise au point⁵ ; mais son intitulé montre qu'à cette époque il s'est intéressé à ce qui sera le thème principal des recherches à l'ILL.

En 1953, il devient responsable de ce service de physique mathématique. C'est à partir de là que Jules Horowitz s'intéressa à plein temps aux réacteurs. C'était l'époque où se développait le programme civil du CEA basé sur des réacteurs refroidis au gaz et utilisant le graphite comme modérateur, seule solution permettant un développement ne faisant appel qu'à des ressources nationales. L'indépendance nationale était très chère à Jules Horowitz et toute sa vie, il se battit pour la défendre. En 1967, quand l'expérience américaine démontra l'avantage économique des réacteurs refroidis à l'eau et utilisant de l'uranium enrichi, il se posa un dilemme que Jules Horowitz résolut en préconisant dans l'immédiat la poursuite de la filière nationale, tout en étudiant la filière américaine et en soutenant la création d'une usine nationale d'enrichissement. Cela se passait au moment de la mise en route du réacteur de l'ILL pour lequel J. Horowitz manifesta toujours un grand intérêt et qu'il continua à suivre de très près quand il devint en 1970 responsable de toute la recherche fondamentale du CEA. C'est à cette époque (1978) qu'il démasqua des escrocs qui prétendaient détecter les gisements de pétrole à l'aide d'« avions renifleurs » et qui avaient soutiré, avec l'approbation des plus hautes autorités de l'État, des centaines de millions de dollars à la compagnie pétrolière française ELF. Une expérience très simple, conçue par lui, permit de prouver l'escroquerie.

Après sa mort, une journée d'hommage, le 13 juin 1996, lui fut consacrée. Des contributions à cette journée, une fois négligé l'aspect nécessairement hagiographique de cet exercice, on peut retirer deux points essentiels sur la personnalité de Jules Horowitz qui ont joué un grand rôle dans son apport à l'ILL.

D'abord sa méfiance vis-à-vis du multilatéralisme. Quand le projet de réacteur européen étudié dans le cadre de l'OCDE

⁴ Voir le livre sur « L'œuvre de Jules Horowitz », tome 1, page 48.

⁵ Je pense posséder l'ensemble des photocopies des articles utilisés pour cette mise au point. Elles portent essentiellement sur la diffusion et les neutrons polarisés. Ces copies sont très largement annotées. L'écriture, comparée à des manuscrits de l'époque, montre qu'il s'agit bien de notes écrites par Horowitz.

(voir le chapitre précédent) échoua, Horowitz à cause de cette méfiance (renforcée par le fait qu'il n'appréciait pas beaucoup Kowarski) fut plutôt satisfait et proposa sa reprise dans un cadre français qui finalement déboucha sur un projet bilatéral qui lui plaisait beaucoup (et devint ensuite trilatéral). Quant le projet de l'ESRF⁶ fut proposé par la Fondation européenne pour la Science (ESF), J. Horowitz fut d'abord réticent et ne fut convaincu que lorsqu'on lui dit que l'ESRF aurait, comme l'ILL, un statut confiant sa gestion à une société civile de droit français⁷. Dans le domaine de la fusion, un projet européen tel qu'il en existait avait sa préférence sur le projet mondialiste ITER. Il semble que la suite lui ait donné raison.

Le deuxième point mis en avant par tous les contributeurs est son extraordinaire talent de négociateur. J'ai pu personnellement l'apprécier à l'ILL, en particulier au cours des discussions avec les Britanniques. Il était très ferme, mais arrivait à imposer son point de vue, d'abord parce qu'il connaissait ses dossiers beaucoup mieux que les autres, qu'il parlait clairement et brièvement et que sa fermeté s'accompagnait d'une grande urbanité qui faisait que ses opposants n'avaient jamais l'impression de céder. On peut regretter qu'il n'ait plus été présent lors des dernières négociations sur ITER.

J. Horowitz était un homme de la parole plutôt que de l'écrit ; en dehors des publications scientifiques de sa jeunesse, il laisse peu d'écrits.

Maier-Leibnitz (1911-2000)

Hermann Heinrich (Heinz) Maier-Leibnitz est né en 1911 à Esslingen sur le Neckar, jolie ville de taille moyenne (90 000 habitants en 1995) un peu à l'est de Stuttgart. Leibnitz était le nom de jeune fille de sa mère, une lointaine descendante du grand savant et philosophe Leibniz. C'est une pratique assez courante en Allemagne d'accoler un deuxième nom quand son nom de famille est aussi courant que l'est Maier. C'est ce qu'avait fait le père de Maier-Leibnitz en accolant le nom de son épouse au sien. Je me souviens que Maier-Leibnitz était très fier de porter ce nom. Son père était professeur à l'université technique (Technischen Hochschule) de Stuttgart.



Figure 2.2. Hermann Heinrich Maier-Leibnitz.

⁶ *European Synchrotron Radiation Facility*, une puissante source de rayons X très complémentaire de la puissante source de neutrons qu'est l'ILL, voir plus loin.

⁷ Ces informations sont reprises de la contribution de Paul Levau à la journée commémorative.

Un de ses oncles, Dr Reinhold Maier, était un homme politique du FDP qui fut ministre président de Baden-Württemberg. Lui-même a fait ses études supérieures à Stuttgart dans l'université technique où enseignait son père. Ce cursus impliquait un stage industriel de six mois qu'il fit dans une fonderie. Après avoir obtenu son diplôme, il part à Göttingen, en 1931. Cette université était alors La Mecque des sciences naturelles (Naturwissenschaften). On y trouvait, entre autres, Max Born, James Franck, Hermann Weyl, Ludwig Prandtl et Richard Courant. James Franck, prix Nobel en 1925, le prend comme étudiant de thèse.

En janvier 1933, Hitler accède au pouvoir et le 13 avril paraît le décret licenciant, sans indemnités, tous les professeurs juifs. Max Born, Richard Courant et d'autres chercheurs d'origine juive doivent quitter Göttingen et émigrer. Franck, profondément antinazi, quitte lui aussi l'Allemagne dès le mois de mai 1933 avec sa famille pour s'établir aux États-Unis. Dans une université de Göttingen profondément sinistrée, Maier-Leibnitz parvient cependant à soutenir en avril 1935 une thèse sur un sujet de physique atomique, les chocs des électrons dans les gaz rares. Ce séjour a beaucoup marqué Maier-Leibnitz. La personnalité et le charisme de James Franck l'ont profondément influencé, au point que certains observateurs disent retrouver chez lui des traits de la personnalité de Franck. Par ailleurs, ce laboratoire dans lequel travaillaient des physiciens dont un grand nombre avaient eu ou auraient plus tard un prix Nobel (Blackett, Maria Göppert, etc.) lui faisait penser⁸ que tout bon physicien obtient un jour ou l'autre ce fameux prix.

En juillet 1935, il part à Heidelberg comme collaborateur de Walter Bothe au Kaiser-Wilhelm Institut pour la recherche médicale (rebaptisé après guerre Max Planck Institut). Cet institut fut créé en 1929 comme un centre multidisciplinaire avec des départements de pathologie, de physiologie, de chimie et de physique. Le premier titulaire de ce département de physique fut Karl W. Hausser qui avait un grand intérêt pour l'interface physique-médecine. Il mourut en 1933, et Walther Bothe qui était directeur de l'institut de physique de l'université d'Heidelberg lui succéda en 1934. Bothe, un physicien nucléaire sans intérêt particulier pour la biologie ou la médecine, s'isola des autres départements dirigés par des chercheurs de premier plan : Richard Kuhn et Otto Meyerhof.

⁸ Je rapporte ici des propos qu'il m'a tenus. Il se référait à l'avant-guerre et disait qu'avec l'accroissement du nombre de physiciens ce n'était plus le cas.

C'était donc une atmosphère beaucoup moins stimulante que celle qu'avait connu Maier-Leibnitz à Göttingen, avant le nazisme. Il travailla avec Bothe au développement de la méthode des coïncidences, qui valut à ce dernier un prix Nobel en 1954, prix que Maier-Leibnitz considéra, me dit-il, comme parfaitement justifié. Rien de spécial à dire jusqu'à ce qu'en décembre 1938 Hahn et Strassmann découvrent la fission de l'atome d'uranium. Peu après, le ministère allemand de la Défense crée un groupe constitué de scientifiques et de militaires pour travailler à l'application de cette découverte pour la création de nouvelles armes. Ce groupe est connu sous le nom d'*Uranverein* (*Uranium club* en anglais). Comme membre de ce groupe Bothe dirigea dans le cadre de l'Institut⁹ d'importantes recherches (essai de purification de l'uranium 235, calculs pour construire un réacteur), liées à l'élaboration d'une arme atomique. Deux de ses assistants furent aussi impliqués : Fleischmann qui fut nommé directeur d'un nouvel institut dans Strasbourg occupé, et Wolfgang Gentner¹⁰ qui fut chargé de l'effort de recherche allemand à Paris. Bothe détestait le régime nazi, mais avait le sentiment qu'il devait être loyal vis-à-vis de son pays natal. Maier-Leibnitz s'était engagé au début de la guerre dans la Luftwaffe, travaillant, en France, au service météorologique. Il revint à Heidelberg en 1942 quand le gouvernement donna une priorité absolue à la recherche et renvoya les chercheurs dans leurs laboratoires. Bothe le dispensa de participation au programme militaire du laboratoire, puisqu'il avait déjà servi son pays. Il put alors reprendre son travail de recherche fondamentale, qui lui permit de publier deux articles après la guerre. Maier-Leibnitz n'a donc jamais participé à l'*Uranverein*.

À l'occasion d'une opération de l'appendicite, il rencontre Rita Lepper qui travaillait comme infirmière dans une clinique. Après deux mois de fiançailles, ils se marient le 25 août 1938. Ils eurent trois filles, Christine, Dorothee et Elisabeth. Ils eurent aussi un fils qui mourut bébé. Madame Maier-Leibnitz était une femme très ouverte, très chaleureuse, sans préjugés et ayant tout naturellement d'excellents rapports avec les autres. Je me souviens d'elle parlant de la période de sa vie où elle assistait aux défilés de mode des grands couturiers parisiens et où elle reproduisait ensuite de mémoire ce qu'elle avait vu.

⁹ Ces informations proviennent de *A history of the Max Planck Institute for medical research* que l'on trouve sur Internet.

¹⁰ À Paris, Gentner fut l'auteur d'actes courageux. Il parvint entre autres à faire libérer Paul Langevin qui avait été pris comme otage. Il fut l'un des membres du premier comité de direction de l'ILL.

Cet aspect de son épouse n'est pas mentionné dans le livre de Anne-Lydia Edingshaus (Heinz Maier-Leibnitz, *Ein halbes Jahrhundert experimentelle Physik*) publié en 1986, qui comporte beaucoup de souvenirs de Maier-Leibnitz. Il en était un peu choqué, lui qui fut toujours très intransigent sur la morale. Mais il savait apprécier le caractère de son épouse. Je pense qu'une partie de la réussite de Maier-Leibnitz à Grenoble doit lui être attribué.

Je reviens à la carrière scientifique de Maier-Leibnitz. En 1942, il est nommé Dozent (chargé de cours) à Heidelberg et soutient son habilitation. Après la guerre, il part un an aux États-Unis. Il est nommé professeur extraordinaire à Heidelberg en 1949. Puis, en 1952, il est nommé professeur titulaire de physique technique à Munich. En 1956, il négocie aux États-Unis, au nom de l'état de Bavière, l'achat d'un réacteur du type pile piscine. À partir de cette époque, l'optique des neutrons devient son champ d'activité principal. Il invente avec ses collaborateurs (Tasso Springer, Tony Heidemann) de nouvelles méthodes¹¹. Ces inventions eurent une grande importance dans la conception des instruments de l'ILL. Elles sont développées dans le corps du texte. La suite de la vie de Maier-Leibnitz s'identifie avec l'histoire de l'Institut jusqu'à son départ en 1972. En juillet 1971, son épouse décède d'un cancer. Sa secrétaire, Silvia Brügelmann l'a vu plusieurs fois secoué de sanglots, au bureau, car il était assez authentique pour ne pas réprimer complètement cette grande douleur qu'était pour lui la mort de sa femme. Cela ne l'a pas empêché de remplir sa tâche de directeur jusqu'au bout. À son départ en janvier 1972, commence pour lui une nouvelle époque. Il était devenu difficile pour lui de revenir vivre à Munich. C'est alors qu'il accepta la responsabilité de la présidence de la *Deutscher Forschungsgemeinschaft Gewalt* (DFG), qui est un peu l'équivalent allemand du CNRS, mais avec des pouvoirs beaucoup plus grands pour son président. L'Académie française des sciences l'élut en 1978 comme membre associé étranger.

La personnalité de Maier-Leibnitz

Maier-Leibnitz avait certainement une forte personnalité, assez complexe. Je pense que l'on peut s'en faire une bonne idée à partir de ses réponses à un questionnaire, publiées en 1991

¹¹ Décrites en détail par ces deux collaborateurs dans un article publié en 2002 après la mort de Maier-Leibnitz dans le journal *Neutron news*, 13, p. 32-36.

par Paul Kienle à l'occasion de son quatre-vingtième anniversaire et que je reproduis¹² ici.

Quel est pour vous le plus grand malheur ? Ne plus être là pour quelqu'un.

Où souhaiteriez-vous vivre ? Près des gens, à proximité d'une bibliothèque.

Quel est pour vous le plus grand bonheur sur Terre ? Pouvoir être seul, ne pas être seul.

Quelles sont les fautes que vous pardonnez le plus facilement ? Celles qui ne sont pas commises par intérêt personnel ou par mépris des autres.

Vos héros de romans préférés ? Je ne sais pas.

Le personnage historique que vous préférez ? Socrate.

Vos héroïnes préférées dans la réalité ? Je ne le dirai pas.

Vos héroïnes préférées dans la poésie ? Je ne sais pas.

Votre peintre préféré ? El Greco.

Votre compositeur préféré ? Mozart.

Quels sont les qualités que vous appréciez le plus chez un homme ? La franchise, la cordialité, la curiosité.

Quels sont les qualités que vous appréciez le plus chez une femme ? Toutes.

Quels sont les vertus que vous appréciez le plus ? L'absence de jalousie, la sympathie envers ses semblables.

Votre occupation préférée ? Toutes celles qui ont une chance d'aboutir à quelque chose.

Qui ou qu'est-ce que vous auriez souhaité être ? Un philosophe impliqué dans les questions sociales dans cinquante ans.

Votre principal trait de caractère ? Le manque d'assurance.

Qu'appréciez-vous le plus chez vos amis ? L'affection et la critique.

Votre plus grand défaut ? Le manque de courage ? (On ne se connaît pas soi-même).

¹² Dans une traduction due à Claire Gubian.

Votre rêve de bonheur ? Découvrir quelque chose.

Quel serait pour vous le plus grand malheur ? L'absence de liberté.

Que voudriez-vous être ? Un ami.

Votre couleur préférée ? Le jaune.

Votre fleur préférée ? Le lis des champs.

Votre oiseau préféré ? Le rossignol.

Votre auteur préféré ? Shakespeare.

Le poète lyrique que vous préférez ? La poétesse Hilde Domin.

Quels sont vos héros dans la réalité ? Robert Schumann.

Vos héroïnes dans l'histoire ? Marie-Antoinette.

Votre prénom préféré ? Elisabeth.

Que détestez-vous le plus ? La cruauté.

Quel personnage historique méprisez-vous le plus ? On ne devrait mépriser (presque) personne.

Quelles réalisations militaires admirez-vous le plus ? Tout ce qui a contribué à éviter une guerre de grande ampleur après 1945.

Quelle réforme admirez-vous le plus ? La réforme du baron von Stein.

Quel don naturel auriez-vous aimé avoir ? L'intuition.

Comment souhaiteriez-vous mourir ? Pas devant (ou avant)¹³ l'être aimé.

Votre état d'esprit actuel ? La curiosité, l'affection.

Votre devise ? Celui qui est actif longtemps vit longtemps.

Souvent les réponses à ce type de questionnaire manquent de sincérité, mais ce n'est absolument pas le cas ici. On peut bien voir l'intérêt de Maier-Leibnitz pour la science et plus généralement la connaissance. Il aimait à dire que « savoir est mieux que de ne pas savoir ». Mais cet intérêt allait de pair avec celui qu'il avait pour les êtres humains. Dans tous les recrutements que je lui ai vu faire, les qualités humaines comptaient

¹³ La traduction de cette réponse pose problème. Le texte allemand est *Nicht vor dem geliebten Menschen*, et *vor* peut être traduit en français par devant ou avant, ce qui change complètement le sens de la réponse.

autant que les compétences scientifiques. Il est certain que cela a largement contribué à la bonne atmosphère qui caractérise l'Institut. Cela dit, il est clair que la forte personnalité de Maier-Leibnitz impressionnait beaucoup les jeunes¹⁴ et que certains avaient même un peu peur de lui, mais, c'est souvent le cas avec les fortes personnalités. Il estimait beaucoup ceux d'entre eux qui avaient le courage de lui résister. Ce fut le cas d'Andreas Freund qui l'admirait mais pensait qu'il n'avait pas toujours raison. Silvia Brügelmann témoigne de la confiance qu'il avait dans ses collaborateurs et il appréciait qu'on lui pose des questions.

J'ai trouvé dans un livre, *Flow* (1990), traduit en français sous le titre de *Vivre* (2004), du psychologue américain Mihaly Csikszentmihalyi, la description d'une petite activité que Maier-Leibnitz avait inventée pour occuper des moments creux, en particulier quand il avait à écouter une conférence ennuyeuse. Maier-Leibnitz commençait par taper du pouce droit, ensuite il faisait de même avec le majeur, l'index, l'annulaire puis le majeur de nouveau et finalement l'auriculaire de la main droite. Ensuite il faisait la même chose avec la main gauche. Après cette série, il inversait la séquence de la main droite, puis celle de la main gauche. Il trouva des combinaisons suffisantes pour totaliser 888 coups. Cette activité allégeait l'ennui, mais son caractère automatique permettait que son attention soit réactivée si quelque chose d'intéressant était dit. Je n'ai aucun souvenir de cela ; Andreas Freund son étudiant à l'ILL non plus. Sylvia Brügelmann sa secrétaire de l'époque ne s'en rappelle pas plus, mais me dit qu'elle pouvait imaginer une chose pareille. Le professeur Csikszentmihalyi me dit dans un courrier électronique qu'il connaissait bien Maier-Leibnitz et sa seconde épouse et qu'il avait passé plusieurs semaines chez lui au début des années 1990 et que c'est alors que Maier-Leibnitz lui a parlé de cela. Le fait que je n'en ai aucun souvenir peut provenir de mon manque du sens de l'observation ; peut-être ne s'ennuyait-il pas avec Freund et moi-même. Je pense qu'il devait se livrer à cette activité avec beaucoup de discrétion.

En fait Maier-Leibnitz, malgré sa grande taille (environ 1,90 m), était un timide très émotif. Il évitait de manifester publiquement son émotivité. Il y avait un domaine dans lequel sa timidité s'estompait, c'est celui de la cuisine. Il était

¹⁴ Un jeune théoricien des débuts de l'ILL disait volontiers : « Chaque fois que je parle avec Maier-Leibnitz, j'en ai pour des semaines à réfléchir à ce qu'il m'a dit ».

incontestablement un excellent cuisinier et le savait. Il faisait appel à cette compétence pour établir des liens informels et amicaux avec ceux qu'il aimait bien. Ces repas, en tout cas ceux auxquels j'ai eu le plaisir de participer, se déroulaient suivant un cérémonial précis : un seul plat, de la salade et du fromage (qu'il achetait lui-même) et, après le repas la dégustation d'une bonne bouteille, le plus souvent de Bourgogne (nous avons longtemps eu le même fournisseur, vigneron à Volnay). J'ai cru que ce vin servi après le repas, comme il l'est dans les collèges d'Oxford et de Cambridge, était aussi une habitude allemande ; il n'en est rien. Je puis témoigner de l'intérêt réel de Maier-Leibnitz pour le bon vin. Lors d'un voyage en Bavière, il nous fit découvrir d'excellents vins allemands. Sa passion pour la cuisine l'a même poussé à rédiger trois livres de cuisine. Je citerai le premier : *Kochbuch für Füchse* (livre de cuisine pour gens futés), *Grosse Küche-schnell und gastlich* (grande cuisine rapide et conviviale) publié par Piper en 1980. Dans ce livre, il entrelarde ses recettes de souvenirs de rencontres avec les grands de ce monde.

Cet aspect de Maier-Leibnitz est l'un de ceux qui le rapprochaient de Louis Néel. Je crois que ce dernier cuisinait un peu lui-même, mais il avait surtout un goût pour les bonnes choses. La maison d'hôtes du CENG, un peu au-dessus de Grenoble, était tenue par Monsieur Foiche qui y faisait une excellente cuisine bressane (la meilleure suivant ce que dit Néel dans son livre de souvenirs) que Louis Néel aimait faire connaître à ses hôtes : une cuisine gardant le goût des choses. C'était aussi le cas de la cuisine que préparait Maier-Leibnitz. Après son prix Nobel, Néel fut invité à un repas chez Bocuse (il a même été filmé dans sa cuisine), alors le plus célèbre cuisinier de France. Je lui demandais ensuite ce qu'il en avait pensé : « C'est une cuisine scandaleuse », me répondit-il, « car elle n'a plus le goût des choses ». Après le premier voyage que Maier-Leibnitz fit en Allemagne de l'Est, alors que je lui demandais ses impressions, il me dit qu'il y avait beaucoup de choses à y critiquer, mais qu'on y trouvait des pommes, ayant du goût, identiques à celles qu'il mangeait avant la guerre.



Figure 2.3. Louis Néel.

Louis Néel (1904-2000)

Le rôle de Louis Néel dans la création de l'ILL est d'une nature très différente de celui de Maier-Leibnitz et de Jules Horowitz, mais il est cependant essentiel. Je ne sais pas si sans

lui l'ILL aurait existé, mais il n'aurait certainement pas été créé à Grenoble et aurait été très différent de ce qu'il est.

Louis Néel est né en 1904 à Lyon. À l'âge de 7 ans, il est atteint par la poliomyélite ; il boitera toute sa vie. En 1924, il est reçu à l'École normale supérieure, à Paris. En 1928, il devient assistant de Pierre Weiss à Strasbourg. Ce dernier est alors le meilleur spécialiste français du magnétisme. En 1932, Néel soutient sa thèse et en 1937, il est nommé professeur quand Weiss part à la retraite.

C'est à cette époque qu'il conçoit l'existence de composés, nommés antiferromagnétiques, composés de deux réseaux cristallins équivalents mais aimantés en sens inverse. La plupart des théoriciens, à l'exception de Van Vleck, ne croyaient pas à l'existence de tels composés. Néel en gardera une méfiance vis-à-vis des théoriciens et une très grande estime pour Van Vleck. Il n'existait pas de preuves expérimentales de l'existence de tels composés. Mais bientôt on trouva que le composé MnO avait une susceptibilité magnétique se comportant en fonction de la température comme le prévoyait Néel pour ces composés. Il fallut attendre 1949 pour que Schull démontre à l'aide de la diffraction des neutrons la justesse des prédictions de Néel. Cela était suffisant pour induire chez Néel un grand intérêt pour les neutrons et donc pour les réacteurs qui les produisent.

Pendant la guerre, il travaille au centre de recherche de la marine nationale sur les mines magnétiques. Il a l'idée de faire désaimanter les bateaux. C'est une opération très lourde qui réclamait de Néel des qualités allant au-delà de celles qu'on demande à un chercheur. De cette période, il gardera une grande estime pour les marins et un goût pour le travail industriel.

En 1940, alors que l'université de Strasbourg est transférée à Clermont-Ferrand, il choisit, sur une proposition de Félix Esclangon, qui dirigeait l'Institut polytechnique de Grenoble, de s'installer à Grenoble, ce qui lui est accordé. On trouve sur le Grenoble d'avant-guerre la description suivante dans un interview donné par Jean Wiart¹⁵ : « Grenoble où l'université était toute neuve, mais où on ne faisait rien ; on voyait dans les couloirs des appareils qui avaient coûté très cher et qui étaient là depuis deux ans sans avoir été déballés ». Telle était la recherche à Grenoble avant l'arrivée de Néel. Il y crée son laboratoire, dit du ferromagnétisme, et qui deviendra après la guerre le Laboratoire d'électrostatique et de physique du

¹⁵ Cahiers pour l'histoire du CNRS, 1989, 2, p. 13-34.

métal (LEPM), premier laboratoire propre au CNRS en dehors de Paris. Il est situé dans l'Institut Joseph Fourier, un bâtiment qu'il partage avec les mathématiciens, et qui était jusqu'alors partiellement inoccupé. En 1943, Félix Bertaut rejoint ce laboratoire pour y créer un groupe de cristallographie par rayons X. En 1956, Néel obtient du CEA la création à Grenoble d'un Centre d'études nucléaires (CENG). Il avait été motivé par deux raisons. La première était son désir de créer une section de génie atomique à l'Institut polytechnique dont il avait la direction. La deuxième était le besoin de mettre à la disposition de Bertaut une source de neutrons. L'ancien polygone d'artillerie, à deux kilomètres du centre de Grenoble, était désaffecté depuis longtemps. Les armées, après de longues démarches acceptèrent de céder quatre-vingts hectares. Ce terrain plus grand que ce dont avait besoin le CEA a permis, beaucoup plus tard, de proposer un site pour l'implantation de l'ILL, puis encore plus tard pour l'ESRF. L'idée de créer un enseignement de génie atomique dans le cadre d'une école d'ingénieurs était nouvelle, et démontre l'intérêt que Louis Néel eut toujours pour les réacteurs nucléaires et l'énergie qu'ils peuvent produire.

Pour la création de l'ILL, les relations existantes¹⁶ entre Néel et Maier-Leibnitz au sein du bureau de l'union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) furent importantes. Puis, une fois l'ILL créé, le CENG apporta toute son aide au nouveau venu.

Louis Néel fut pour Grenoble une sorte de monarque scientifique éclairé, directeur de tous ou presque tous les laboratoires scientifiques de la ville. Son action a certainement conduit au développement spectaculaire de Grenoble. Il a œuvré pour établir des relations entre le CEA et le CNRS et les laboratoires universitaires. Il a, en outre, favorisé les relations entre l'industrie et l'université. Il a laissé derrière lui des laboratoires de qualité. Le développement actuel de Grenoble est très certainement le résultat de la venue d'industries novatrices, elles-mêmes attirées par la présence des laboratoires liés au CNRS ou au CEA. Mais, comme tout monarque, il était souvent difficile d'abord. Dans un texte paru, en 2000, dans les annales de la fondation Louis de Broglie, Georges Lochak, président de cette fondation, écrit : « Néel était un chef avec ce que cela suppose d'esprit de décision, de capacité de choisir,

¹⁶ Il ne m'a pas été possible de retrouver ni quand, ni où ils se sont rencontrés pour la première fois. Leurs témoignages écrits dans leurs livres de souvenirs sont contradictoires.

de caractère parfois un peu abrupt ». Il pensait toujours avoir raison et le plus souvent cela était vrai. Pierre Averbuch, l'un de ses anciens collaborateurs, dit que Néel n'était pas autoritaire mais que personne n'aurait imaginé ne pas satisfaire ses désirs. Pour lui, le développement scientifique et industriel de Grenoble était prioritaire. Il a travaillé à inverser le courant qui poussait les bons chercheurs provinciaux à partir à Paris. Sa démarche pour l'implantation de l'ILL à Grenoble procède de ce désir. Il a essayé d'y attirer des Parisiens de haut niveau (de Gennes, Nozières). Il leur en a voulu pour leur refus. Finalement Nozières vint, attiré par l'ILL, ce qui a permis une amélioration de leurs rapports. Je pense que l'association du CNRS à l'ILL lui est due, mais je n'en ai pas la preuve.

Néel travaillait beaucoup par contacts directs plutôt que par correspondances. Ce que j'ai dit plus haut à propos de Maier-Leibnitz s'applique aussi à Louis Néel : il laisse peu d'écrits en dehors de ses publications d'avant-guerre et de l'immédiat après-guerre. Elles étaient presque toutes rédigées¹⁷ en français. Dans la quasi-totalité de ces publications, le plus souvent une interprétation des résultats expérimentaux collectés par d'autres, il est le seul auteur. Il n'a jamais mis sa signature sur un article portant sur un travail auquel il n'avait pas participé, le plus souvent en interprétant les résultats expérimentaux collectés par d'autres. En effet, si avant-guerre il faisait à la fois les expériences imaginées par lui et le travail théorique allant avec, après-guerre, il n'a plus fait lui-même les travaux expérimentaux qu'il imaginait. Cette éthique au sujet des publications représente un autre point commun entre lui et Maier-Leibnitz. De nos jours, hélas, beaucoup de directeurs de laboratoire ont une liste impressionnante de publications car ils imposent que toute publication sortant du laboratoire porte leur signature, même s'ils n'ont pas participé au travail. (Il laisse aussi un livre de souvenirs publié alors qu'il était à la retraite depuis près de vingt ans.) La comparaison entre Maier-Leibnitz et Néel pourrait être développée. J'ai mentionné plus haut leur goût commun pour la bonne chère. Mais si beaucoup de collaborateurs de Maier-Leibnitz ont pu apprécier sa cuisine, je n'ai rencontré personne qui ait goûté celle de Néel. En effet, ce dernier n'a jamais mêlé sa vie personnelle à sa vie professionnelle. Quand il recevait un collègue c'était toujours à la maison d'hôtes du CEA. Tous deux ont eu une grande influence sur le travail de leurs collaborateurs auxquels ils surent

¹⁷ Je n'ai trouvé qu'un article publié en 1953 dans la revue américaine *Review of Modern Physics* qui soit écrit en anglais.

transmettre leur savoir. Mais il semble, d'après plusieurs témoignages, que tous les deux furent d'assez médiocres enseignants à l'université.

L'attitude de Néel vis-à-vis de la physique théorique est complexe. Lui-même appartenait à cette race en voie de disparition de chercheurs à la fois expérimentateurs et théoriciens. Ses apports théoriques ne faisaient appel qu'à la physique classique. Mais il connaissait assez de mécanique quantique pour en enseigner une introduction au niveau de la licence. Il a fortement soutenu la création de l'École de physique des Houches (dans un lieu qui dépendait de l'académie de Grenoble), école qui pour la première fois en France va enseigner à son plus haut niveau la physique du xx^e siècle. Lui-même reprochait à l'université d'avoir, avant-guerre, négligé de dispenser cet enseignement. Il avait pour Louis de Broglie, pionnier solitaire ignoré par l'université, un grand respect en particulier à cause de ce trait de caractère solitaire.

Le lieu où se trouvent maintenant rassemblés le CENG, l'ILL, l'ESRF, et divers instituts du CNRS, porte le nom de Polygone Louis Néel. C'est un hommage parfaitement justifié à celui qui a su acquérir ce terrain et y implanter ou faciliter l'implantation de tous ces lieux de recherche. Il est difficile de comprendre que la ville de Grenoble n'ait pas donné le nom de Louis Néel à une artère de cette ville qui lui doit tant pour l'avoir transformée d'une petite ville de province en une grande métropole connue du monde entier.

Chapitre 3

Pourquoi investir tant d'argent dans une source de neutrons ?

Avec les deux chapitres précédents nous en avons fini avec la préhistoire et il est temps de regarder comment l'accord verbal de Genève s'est concrétisé. Mais avant, il me paraît utile d'étudier de plus près à quoi peuvent servir les faisceaux de neutrons. L'expérience de Shull et Wollan mentionnée plus haut fut réalisée à l'aide d'un faisceau de neutrons issu d'un réacteur qui n'avait pas été construit spécialement pour cela. Le projet franco-allemand était celui d'un réacteur construit uniquement pour produire des faisceaux de neutrons et d'un coût (traduit en monnaie de 2005) d'environ 300 millions d'euros. Il fallait donc que la justification d'une telle dépense repose sur un dossier scientifique sérieux. Ce sera le thème de ce chapitre, qui n'est pas indispensable pour le lecteur non scientifique.

Les sources de neutrons accessibles aux scientifiques sont plutôt rares car elles nécessitent de grosses machines presque aussi coûteuses qu'un accélérateur de particules ou un gros télescope. Cependant leur objectif n'est pas de découvrir de nouvelles galaxies ou de nouvelles particules¹ mais simplement de nous permettre de voir où sont les atomes et leurs mouvements à l'aide d'une sonde particulièrement bien appropriée. Un grand nombre d'applications sont donc dans le domaine des études de la matière condensée, même s'il existe aussi des applications en physique nucléaire et en physique fondamentale (physique quantique). Il existe dans ce domaine d'exploration de la nature d'autres techniques (rayons X, résonance magnétique nucléaire, spectroscopie Raman, etc.) et l'on

¹ Je reprends ici une idée exposée par D. Clery et G. Vogel dans *Science* 300, p. 1226-7 (2003).

peut se demander pourquoi il est indispensable d'y ajouter les neutrons. Tout simplement parce que les neutrons voient des aspects qui ne sont pas détectés par les autres techniques. C'est pourquoi s'est constituée une communauté d'utilisateurs qui dans leurs propres laboratoires utilisent ces autres techniques et font appel aux neutrons pour compléter et préciser leur vision des échantillons étudiés. Cette communauté d'utilisateurs potentiels était en 1997 de plus de 4 000 en Europe, et plus de 1 000 venaient et viennent toujours chaque année utiliser le réacteur à neutrons de l'ILL. Ces utilisateurs ont à soumettre une proposition d'expérience. Ces propositions sont examinées deux fois par an par des comités composés de chercheurs extérieurs à l'ILL. La surcharge des instruments impose de ne retenir en moyenne qu'une expérience sur deux. La demande est donc très grande. Je passerai successivement en revue les divers domaines d'utilisation des neutrons. Une partie des exemples donnés est empruntée à des expériences récentes, donc postérieures à la décision de construire le réacteur.

Interactions des neutrons avec la cible

Toute cible est constituée d'atomes et c'est avec les noyaux de ces atomes que les neutrons interagissent. Il y a deux interactions possibles : les neutrons sont soit absorbés (capture), soit diffusés. Les probabilités de ces deux événements sont exprimées par ce que l'on appelle leur section efficace. Suivant cette notation très commode, la probabilité d'une interaction d'un neutron est $N\sigma/A$; σ est la section efficace, N le nombre de noyaux dans un échantillon de surface A . Ces sections efficaces sont exprimées en barn, unité de surface bien adaptée, qui vaut 10^{-24} cm². Celles pour la capture sont souvent proportionnelles à la longueur d'onde des neutrons et varient considérablement d'un atome (il vaudrait mieux dire d'un noyau) à l'autre. Elle est nulle pour l'hélium 4, mais très importante pour l'hélium 3. Le bore, le cadmium, le gadolinium (tous les isotopes confondus) et le lithium 6 ont aussi des fortes sections de capture. On peut ainsi les utiliser pour réaliser des détecteurs de neutrons ou pour les dispositifs de contrôle dans un réacteur. Par contre le deutérium, le béryllium, le carbone, l'oxygène, le magnésium capturent très peu les neutrons ; l'aluminium absorbe un peu plus mais pas trop. Ces éléments constituent donc des matériaux de choix pour la construction d'un réacteur ; en particulier c'est le cas de l'eau lourde et du graphite, pour le réflecteur.

Le cas de l'hélium, avec ses deux isotopes ayant des comportements si contrastés, vaut la peine d'être examiné plus en détails : d'une part, l'hélium 3 n'est présent qu'au niveau de 10^{-4} dans l'hélium naturel, ce qui rend ce dernier utilisable sur un parcours des neutrons ; d'autre part, l'hélium 3 est un sous-produit de l'industrie nucléaire assez abondant qui intéresse beaucoup les chercheurs. Tout d'abord c'est le seul matériau simple absorbant fortement les neutrons qui soit un gaz, donc utilisable directement pour réaliser un détecteur (voir le paragraphe sur les détecteurs). Cela a été considéré comme suffisamment important pour que l'ILL purifie en routine cet isotope rare. Mais de plus, il a été montré en 1966, par Larry Passell² à Brookhaven, que l'absorption des neutrons dépendait des orientations relatives des spins du neutron et du noyau d'hélium 3 (on a dit plus haut que les neutrons possédaient un spin de $1/2$; il en est de même pour He3). Seuls les neutrons de spin antiparallèles à celui de l'hélium 3 sont absorbés. Donc si on parvient à remplir un récipient d'hélium 3 polarisé, ce récipient sera transparent à l'un des états de spin du neutron, mais absorbera fortement l'autre. On aurait donc ainsi un équipement permettant de produire des neutrons polarisés. L'intérêt de cette méthode est qu'elle s'applique, à la différence des autres, à un large domaine d'énergie des neutrons. Mais pour cela il faut parvenir à préparer l'hélium 3 polarisé et concentré. C'est le défi qu'a relevé, avec succès, Francis Tasset en collaboration avec plusieurs laboratoires, principalement l'université de Mayence (Otten *et al.*). Nous ne décrivons pas ici la méthodologie très complexe mise en œuvre. Ce projet a été financé par le SERC.

Après avoir parlé de l'absorption des neutrons et de ses applications pratiques, il faut parler du deuxième type d'interaction, la diffusion des neutrons. Le langage ondulatoire³ est dans ce cas le plus approprié. Quand l'onde neutronique incidente rencontre un noyau, une onde émergente est émise dont l'amplitude est a , amplitude qui varie d'un noyau à l'autre et peut même être négative. S'il y a plusieurs noyaux voisins, ces ondes émergentes pourront interférer. Si ces noyaux sont ceux d'atomes disposés sur un réseau cristallin, ces interférences seront, comme dans le cas des rayons X, à l'origine de la formation d'une image de diffraction. Mais dans le cas des neutrons, il y a une complication résultant de ce que l'interaction se fait

² PASSELL L., SCHERMER R.I., Phys. Rev., 1966, 150, p. 146-151.

³ J'ai rappelé plus haut qu'à toute particule élémentaire était associée une onde.

avec les noyaux. La plupart des atomes ont plusieurs isotopes ayant le même nombre d'électrons mais des noyaux différents, et donc des amplitudes de diffusion des neutrons différentes. La présence de ces isotopes n'affecte pas la diffraction des rayons X (qui résulte d'une interaction avec les électrons). En revanche, elle a de l'effet sur la diffusion et la diffraction des neutrons. Ces isotopes sont répartis au hasard sur le réseau cristallin, rendant ce dernier un peu désordonné. Alors la diffusion comprend deux parties : une partie qui contribue à l'image de diffraction et que l'on appelle diffusion cohérente et une partie qui n'y contribue pas nommée diffusion incohérente. Il existe une autre source de diffusion incohérente : la dépendance de la section efficace en fonction des orientations relatives du spin du neutron et de celui du noyau diffuseur. Avec des neutrons non polarisés et une cible non polarisée, cela introduit un désordre équivalent à celui résultant des isotopes.

Si les atomes de l'échantillon sont ceux d'un gaz, l'interaction du neutron s'accompagne d'un recul de cet atome et d'une perte d'énergie des neutrons diffusés. Si les atomes font partie d'un cristal et sont donc en interaction avec leurs voisins, leurs mouvements deviennent collectifs. Ces mouvements sont décrits à l'aide de phonons qui se propagent dans le cristal avec une énergie E et un vecteur d'onde Q . Lors de l'interaction d'un neutron avec l'un de ces atomes, la diffusion se décompose en deux parties : l'une élastique qui est celle que nous avons décrite plus haut, et une dite inélastique au cours de laquelle le neutron absorbe (s'il est de faible énergie) ou crée (si son énergie est suffisante) l'un de ces phonons. L'énergie et la quantité de mouvement totale sont nécessairement conservées et la mesure du changement d'énergie et de quantité de mouvement du neutron donne donc directement les valeurs de ces quantités pour le phonon absorbé (ou émis).

Neutrons et matière condensée

C'est dans ce domaine que se font la grande majorité des applications des neutrons. Elles font usage des propriétés suivantes : les neutrons, comme toutes les particules élémentaires, sont du domaine de la physique quantique et ont, comme nous venons de le voir, à la fois un caractère d'onde et de particule. Les neutrons thermiques ont des longueurs d'onde associée de l'ordre de 1 angström^4 . Pour les neutrons froids, les longueurs

⁴ Un centimètre est égal à 100 millions d'angström (Å).

d'onde sont de l'ordre de 5 Å. Ces mêmes neutrons ont des énergies comparables à celles des phonons. Les neutrons sont donc des particules qui associent deux caractéristiques qui les rendent particulièrement aptes à étudier à la fois les structures et les mouvements internes de ces structures. Il existe donc deux champs d'application : la diffraction (qui ne fait appel qu'au caractère ondulatoire des neutrons) pour déterminer les positions atomiques moyennes (structures), et la diffusion inélastique (qui repose essentiellement sur le caractère corpusculaire des neutrons) pour étudier les mouvements.

Diffraction

Les neutrons peuvent remplir le même rôle que les rayons X, mais ils possèdent deux avantages qui compensent largement, pour certaines applications, l'intensité relativement faible de leurs faisceaux. J'ai déjà mentionné le moment magnétique des neutrons qui les rend uniques pour déterminer les structures magnétiques. C'est dans ce domaine, nous l'avons vu, que furent enregistrés les premiers succès des neutrons, ce qui a valu à Cliff Shull de recevoir, en 1994, un prix Nobel.

Mais les neutrons présentent un autre avantage : en effet, lors d'un choc avec un atome, ils interagissent avec le noyau alors que les rayons X le font avec les électrons qui orbitent autour du noyau. Ceci a pour conséquence que les rayons X ont une interaction 92 fois plus grande avec un atome d'uranium qu'avec un atome d'hydrogène. Ce dernier ne contribuera donc que très peu à une image de diffraction aux rayons X. Au contraire, avec les neutrons, les contributions d'un atome d'hydrogène et d'un atome plus lourd ou beaucoup plus lourd sont du même ordre de grandeur. Il est donc plus facile d'observer les hydrogènes avec les neutrons qu'avec les rayons X. Ceci a eu de nombreuses applications. Très tôt, dès 1969, Benno Schoenborn⁵, faisant usage des hauts flux du réacteur de Brookhaven, étudia une protéine, la myoglobine, complétant ainsi les résultats obtenus par John Kendrew avec les rayons X qui lui avaient valu un prix Nobel en 1962. On peut aussi tirer avantage du fait que l'hydrogène a une amplitude de diffusion négative, alors que le deutérium a une amplitude positive. Les applications en biologie résultant de cette différence ont été décrites par Heinrich Stuhrmann⁶. Cela contribue à faciliter la localisation des atomes d'hydrogène.

⁵ SCHOENBORN B.P., 1969, 224, p. 143-146.

⁶ STUHRMANN H.B., Rep. Prog. Phys., 2004, p. 1073-1115.

Cependant, ce domaine particulier d'utilisation des neutrons aux sciences de la vie n'a pas eu tout le développement que l'on pouvait espérer. Ceci est essentiellement dû à la qualité remarquable des données que l'on peut maintenant collecter avec des rayons X, grâce aux puissantes sources modernes comme le rayonnement synchrotron. Elles permettent, pour des molécules simples, de localiser les atomes d'hydrogène. Mais il reste encore des cas dans lesquels un atome d'hydrogène joue un rôle important dans un mécanisme de catalyse par la protéine étudiée; dans de tels cas, la diffraction des neutrons apportent une information plus détaillée (voir par exemple un travail sur l'endothiapepsine⁷).

Diffusion aux petits angles

C'est un domaine qui s'est considérablement développé. Avec cette méthodologie, on ne cherche pas à déterminer une structure à l'échelle atomique, mais plutôt les dimensions et la forme d'un objet microscopique. Il y a de nombreuses applications tant en recherche fondamentale qu'en recherche appliquée pour l'étude des colloïdes, des polymères, des alliages (étude des grains), des supraconducteurs et des virus. Là aussi, les principaux atouts des neutrons sont leur sensibilité à l'hydrogène et au magnétisme, ainsi que leur capacité à traverser des échantillons épais.

Diffusion inélastique

On mesure le changement d'énergie d'un neutron après une interaction avec des atomes en mouvement. Ces mouvements, comme nous l'avons dit un peu plus haut, sont dans le cas où l'échantillon est un cristal, quantifiés et décrits en termes de phonons. Ces phonons ont chacun un vecteur d'onde Q et une énergie E qu'il faut déterminer pour chaque direction dans le cristal analysé (E en fonction de Q). La mesure du changement d'énergie des neutrons après l'interaction avec ces phonons permet de faire cette détermination. Il y a de nombreuses méthodes pour réaliser cette mesure. J'en décrirai brièvement quelques-unes plus loin. Quand l'échantillon étudié est un liquide, ses mouvements internes sont décrits par une fonction de distribution $G(r, t)$ qui donne la probabilité de trouver au temps t un atome à une distance r d'un autre au temps zéro.

⁷ COATES *et al.*, *Biochemistry*, 2001, 40, p. 13149-13157.

En 1954, Léon Van Hove démontra⁸ que la distribution angulaire et le spectre en énergie des neutrons diffusé sont reliés de façon simple à cette fonction $G(r, t)$. Ce travail théorique eut un impact considérable sur l'utilisation des neutrons pour étudier ce que l'on nomme de nos jours la matière condensée.

La méthode la plus simple dans son principe pour réaliser des expériences de diffusion inélastique consiste à utiliser un cristal monochromateur pour extraire du faisceau les neutrons d'une énergie donnée. Les neutrons d'une certaine énergie sont réfléchis dans une direction donnée définie par la loi de Bragg, $\lambda = 2d \sin \Theta$, dans laquelle d est la distance entre les plans réticulaires utilisés et λ la longueur d'onde associée. Ainsi pour chaque orientation du monochromateur ne sont réfléchis que les neutrons d'une certaine longueur d'onde (donc d'une certaine énergie). Après diffusion par les atomes de l'objet étudié (qui est en général lui aussi sous la forme de monocristal), l'énergie finale des neutrons est mesurée à nouveau à l'aide d'une dernière réflexion sur un monocristal analyseur. Cette méthode, dite du **spectromètre à trois axes** (figs. 3.1 et 3.2), a été mise au point par Bert Brockhouse. Il a montré que l'on pouvait mesurer le changement d'énergie associé à chaque vecteur d'onde Q . Cela lui a valu un prix Nobel en 1994. La figure 3.3 essaye d'expliquer graphiquement le principe de la méthode. Cette méthode a été très largement utilisée et améliorée à l'ILL. L'utilisation de la rétrodiffusion développée à Munich et à Jülich, décrite par ailleurs, permet de mesurer de très faibles changements de l'énergie des neutrons.

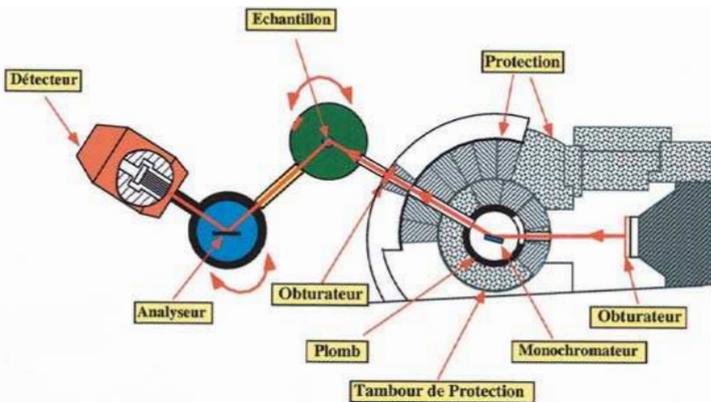


Figure 3.1. Schéma d'un spectromètre à trois axes. Le réacteur est à droite (non représenté) et laisse sortir un faisceau de neutrons.

Un autre type d'appareils conçus pour mesurer cette diffusion inélastique fait appel pour la détermination de l'énergie

⁸ VAN HOVE L., Phys. Rev., 1954, 95, p. 249-262.



Figure 3.2. Photographie d'un spectromètre à trois axes. L'instrument est installé sur un guide de neutrons ce qui permet de réduire considérablement la protection autour du monochromateur.

après diffusion à la mesure du temps que met le neutron pour aller de l'échantillon au détecteur. Les neutrons monochromatiques incidents sont sélectionnés par un monochromateur cristallin tournant qui sert aussi à définir l'instant zéro comme celui auquel le cristal est à la position permettant la réflexion de Bragg. Un faisceau de neutrons monochromatiques peut aussi être sélectionné à l'aide de disques tournants porteurs de fentes qui ne laissent passer que les neutrons ayant une certaine vitesse (fig. 3.4).

Neutrons polarisés

Dans beaucoup d'expériences, élastiques et inélastiques, il est nécessaire d'utiliser des neutrons polarisés, c'est-à-dire des neutrons qui occupent majoritairement l'un des deux états quantiques possibles de spin $1/2$ (ce qui dans le cas où il y a un champ magnétique se traduit par le fait que le moment magnétique du neutron est soit parallèle soit antiparallèle à ce champ). Il y a plusieurs méthodes pour produire de tels faisceaux dont l'aimantation moyenne pointe dans une direction.

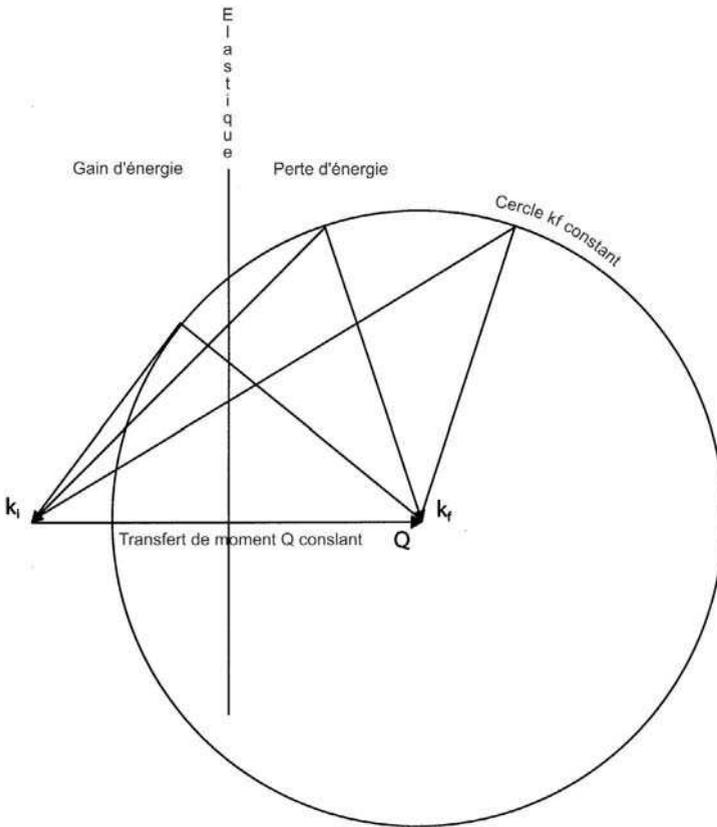


Figure 3.3. Ce schéma illustre l'une des utilisations d'un spectromètre à trois axes permettant de mesurer le changement d'énergie associé à un vecteur d'onde Q . Ici, on utilise une énergie finale constante et l'on fait varier l'énergie incidente et les angles entre les bras de façon à satisfaire à la géométrie représentée dans la figure.

Elles font toutes appel à la différence de comportement des neutrons selon leur état de spin dans un matériau lui-même polarisé. Ceci fut suggéré par Felix Bloch dès 1936 (dans un article, d'une seule page⁹, dans lequel il émettait l'hypothèse de l'existence d'un moment magnétique du neutron). Dès 1937, Hoffman, Livingstone et Bethe¹⁰ produisaient en très faible quantité les premiers neutrons polarisés, en utilisant la transmission des neutrons au travers du fer aimanté par application d'un champ magnétique, méthode suggérée par Bloch dans son article.

On sait maintenant polariser efficacement les faisceaux de neutrons. J'ai parlé plus haut de l'utilisation d'hélium 3 dont les spins nucléaires peuvent être polarisés par pompage optique. Plus couramment, on utilise un monochromateur

⁹ BLOCH F., Phys. Rev., 1936, 50, 259.

¹⁰ HOFFMAN J.G., STANDLEY LIVINGSTONE M., BETHE H.A., Phys. Rev., 1937, 51, p. 214-215.

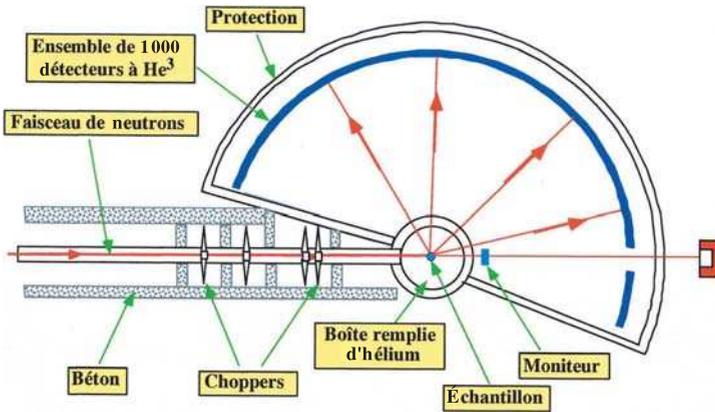
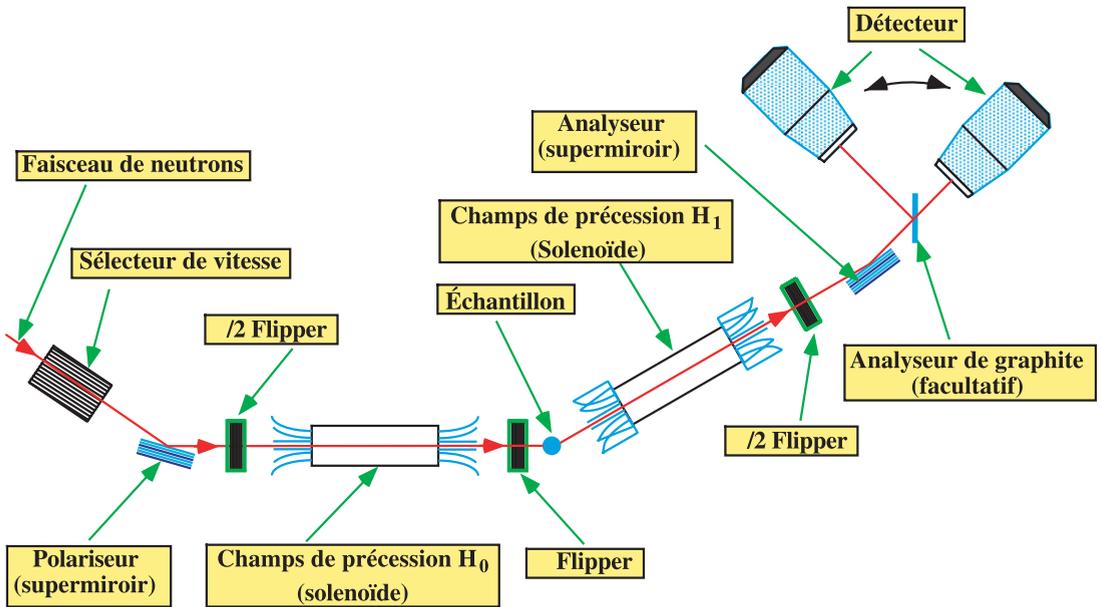


Figure 3.4. Schéma du spectromètre IN5 utilisé pour la diffusion inélastique. L'appareil est installé sur un guide de neutrons provenant de la source froide (avec un flux maximum aux environs de 4 à 5 Å) ; il comporte quatre disques tournant (choppers) à 20 000 tours par minute. Ces disques sont recouverts vers leur périphérie d'un matériau absorbant les neutrons (oxyde de gadolinium) et sont percés vers leurs périphéries de deux fentes de $2 \times 5 \text{ cm}^2$ laissant passer le faisceau de neutron. Le faisceau qui est passé par le premier chopper ne passera au travers du quatrième que si sa vitesse est telle qu'il y arrive juste au bon moment pour passer au travers d'une fente. Il y a donc sélection de neutrons d'une vitesse donnée (donc d'une énergie donnée). Pour arriver à ce résultat, il faut que les vitesses de rotation des choppers soient bien constantes et que le phasage soit très précis. Il l'est avec une précision de 0,5 milliradian. Ces deux rotors suffisent à assurer la production d'un faisceau monochromatique. Mais avec seulement deux rotors passeraient aussi les neutrons ayant une vitesse représentant la moitié de celle sélectionnée. De plus, la présence de plusieurs fentes permettrait le passage de neutrons indésirables. C'est le rôle du second chopper d'éliminer ces intrus. Les neutrons diffusés sont collectés par une immense batterie de détecteurs situés à 4 mètres. La mesure du temps qu'ils ont mis à parcourir cette distance donne leur vitesse et donc leur énergie. Après diffusion, les neutrons peuvent avoir perdu ou gagné de l'énergie. Peuvent donc arriver ensemble des neutrons qui ont gagné de l'énergie et d'autres d'un pulse précédent qui en avaient perdu. Le rôle du dernier rotor est d'éliminer ce phénomène.

cristallin ferromagnétique ou un miroir (ou supermiroir) polarisé. La polarisation après diffusion peut être déterminée avec des dispositifs analogues. De plus il est possible de renverser le sens de la polarisation à l'aide d'un champ magnétique adéquat (bobine de retournement usuellement désigné par son nom anglais, *flipper*).

Écho de spin des neutrons

Cette méthode, qui permet de mesurer de très faibles changements d'énergie, fut inventée en 1972 par Ferenc Mezei. Le principe en est décrit à la figure 3.5. Il diffère totalement de ceux utilisés dans les autres appareils pour la diffusion



inélastique et mérite donc une description sommaire. Le faisceau de neutrons est préalablement rendu grossièrement monochromatique par le passage au travers d'un sélecteur de vitesse. Ensuite, les neutrons sont d'abord polarisés parallèlement à la direction d'un faisceau à l'aide d'un supermiroir, puis ils passent au travers d'un *flipper* calculé pour faire tourner la direction de polarisation de 90 degrés ; puis ils traversent un solénoïde, dont le champ est dirigé selon l'axe de propagation des neutrons. Dans ce champ, les spins des neutrons tournent autour de cet axe (un phénomène connu sous le nom de précession de Larmor), l'angle de rotation dépendant de leur vitesse. Les neutrons sortent alors dépolarisés, leurs spins ayant subi un grand nombre de précessions de Larmor. À la sortie de ce solénoïde, ils passent au travers d'un nouveau flipper qui fait tourner tous les spins de 180 degrés. Après quoi, ils passent dans une deuxième partie identique à la première. Au cours de la précession le long du deuxième solénoïde, les neutrons sont repolarisés. Après une rotation de 90 degrés, la polarisation finale est mesurée.

En l'absence d'échantillon, la polarisation finale est identique à la polarisation initiale. La présence d'un échantillon entre les deux solénoïdes est susceptible d'induire des changements de vitesse des neutrons diffusés modifiant la précession dans le second solénoïde. À la sortie de l'ensemble, la

Figure 3.5. Principe du spectromètre à écho de spin.

polarisation sera différente de la polarisation initiale. Mezei a démontré que la mesure de ce changement de polarisation permet une détermination très précise du changement de vitesse. Le nom donné à cette méthode vient de ce qu'elle s'inspire d'une méthode, très utilisée en résonance magnétique nucléaire, qui porte le nom d'écho de spin. La résolution que cette méthode permettait d'atteindre avec les premières versions de ces instruments était environ dix fois meilleure que celle obtenue avec la rétrodiffusion. Les versions plus récentes, qui utilisent des neutrons de plus grandes longueurs d'onde, sont encore plus performantes d'un autre facteur dix.

L'écho de spin est une technique de mesure ultrasensible qui, seule, permet l'observation de mouvements lents comme ceux de reptation des macromolécules. Ce mouvement invoqué par Pierre-Gilles de Gennes pour expliquer le comportement des plastiques a donc reçu sa première confirmation expérimentale grâce à l'écho de spin des neutrons.

En pratique, les scientifiques utilisent rarement une seule technique pour observer la dynamique de la matière et ils tentent de couvrir le plus large domaine possible en énergie (en vitesse de déplacement) en combinant des mesures de diffusion inélastique des neutrons sur spectromètre à trois axes, sur spectromètre à rétrodiffusion et par écho de spin, mais aussi par diffusion inélastique des rayons X.

Physique nucléaire et physique fondamentale

Les expériences de physique nucléaire à faire autour d'un réacteur portent en partie sur l'étude de la fission. Les produits de fission sont analysés par un spectromètre pour déterminer leurs masses et leurs charges. Dans d'autres expériences, on étudie le rayonnement émis par un noyau activé par la capture d'un neutron. Ce rayonnement peut consister soit en des rayons γ , soit en des électrons dits de conversion éjectés du noyau. Des appareils ont été construits à l'ILL, pour étudier ces deux types de rayonnement.

Le neutron est lui-même une particule élémentaire dont il est important d'étudier les propriétés. Nous verrons, au moment de faire le bilan de l'ILL, que c'est un domaine dans lequel les neutrons ont apporté des contributions fondamentales, tant sur la mécanique quantique que sur le modèle standard des particules élémentaires et ses limites éventuelles.

J'ai cité ces exemples d'applications des neutrons pour démontrer que de la physique la plus fondamentale peut être étudiée à l'aide de ces particules. Cependant la plus grande partie des quelques 700 expériences réalisées chaque année à l'ILL portent sur la détermination de structures magnétiques, la localisation précise des atomes d'hydrogène dans les molécules organiques, y compris les protéines, et l'étude des mouvements dans les solides et les liquides avec cette particule devenue familière pour de nombreux scientifiques. Ces mesures seraient pour la plupart impossibles avec d'autres techniques.

Cet exposé montre l'extraordinaire variété des domaines dans lesquels les neutrons sont utiles. C'est cette variété qui justifiait le gros investissement que représente la construction d'un réacteur à haut flux.

Je donnerai d'autres exemples d'applications des neutrons dans le dernier chapitre qui fera le bilan de l'opération Institut Laue-Langevin. Comme on le verra, ce bilan montre *a posteriori* que cet investissement relativement lourd était justifié.

Chapitre 4

Négociations

L'acte créant officiellement l'ILL ne fut signé que le 17 janvier 1967, ce fut donc un long processus. Il faut bien comprendre que l'accord de Genève de 1964 avait été conclu sur la base d'un projet encore très peu élaboré et que s'il existait un désir de construire à Grenoble¹ une source de neutrons franco-allemande, il restait à préciser la nature de cette source et à en faire un projet détaillé avec une estimation financière aussi précise que possible. En effet au moment de la conférence de Genève, on ne savait pas si une telle source coûterait 50 ou 500 millions de francs. Les ministres déclarèrent² qu'il ne fallait pas s'arrêter à ce détail et qu'on verrait bien. Il fallait aussi définir le cadre juridique dans lequel cette source de neutrons pourrait être construite. Il était donc nécessaire que plusieurs groupes se mettent au travail :

- un groupe élaborant un avant-projet de la source de neutrons ;
- un ou plusieurs groupes pour préciser les besoins des physiciens et autres chercheurs ;
- un groupe élaborant le cadre juridique et le contrat précisant les statuts de la société à créer.

Comme il y avait nécessairement des interférences entre ces différents points, une coordination entre ces groupes était indispensable. Il fallait au préalable que ces groupes de travail soient créés et pour cela que les autorités des deux pays désignent ceux qui auraient la charge de les mettre sur pied.

Il me semble que tout fut lancé au cours d'une réunion qui se tint à Grenoble le 22 ou 23 février 1965³. Du côté allemand,

¹ La possibilité d'un site allemand fut envisagée par certains Allemands et finalement abandonnée et ne fut jamais évoquée dans les discussions franco-allemandes.

² Ceci est mentionné dans la discussion Maier-Leibnitz–Spinger. Cela est certainement vrai, car ce sont des choses que l'on n'invente pas.

³ Voir la lettre de Maier-Leibnitz à Néel du 3 février 1965.



Figure 4.1. Heinz Beckurts.

les participants étaient, à côté de Maier-Leibnitz, Beckurts de Karlsruhe, Springer et Armbruster de Jülich et Fiebiger de Franckfort. Du côté français, je n'ai pas retrouvé de document indiquant les participants : à côté de Néel, il y avait, outre moi-même, sans aucun doute Dautray et sans doute Ageron et Denielou. Au cours de cette réunion, Dautray a présenté un avant-projet qu'il avait conçu à la demande de Horowitz (communication personnelle de Dautray). Maier-Leibnitz donna son accord sur cet avant-projet, et désigna Beckurts⁴ (fig. 4.1) comme correspondant allemand pour la réalisation du projet détaillé du réacteur.

Source de neutrons

Dautray et Beckurts se mirent aussitôt au travail pour élaborer le projet de réacteur. Tous les deux disposaient de groupes existants pour les aider. Kouts, qui avait construit le réacteur haut flux de Brookhaven, passa une grande partie de l'année 1966 à Saclay, apportant sans aucune restriction son expérience. L'expérience soviétique fut aussi mise à contribution. En juin 1966, un groupe, sous la conduite de Pierre Balligand (l'adjoint de Néel à la direction du CENG) et comprenant la presque totalité des Français qui participeront à l'équipe projet, se rendit en URSS pour voir ce qui s'y faisait en matière de réacteurs de recherche et pour parler de l'élément combustible.

Le concept de réacteur pulsé fut rapidement éliminé pour les raisons que j'ai mentionnées plus haut. Cependant Maier-Leibnitz garda toujours un certain regret de la mise à l'écart du groupe d'Ispira, qui continua de son côté à élaborer son projet de réacteur pulsé. Dans les notes de Dautray et les questions posées par lui, dont il me reste des traces écrites, il n'est question que d'un réacteur statique. Mais il restait encore beaucoup de choix à faire. Et au cours de l'année 1966, de nombreuses réunions se déroulèrent pour prendre des décisions sur certains aspects du projet.

Choix eau légère-eau lourde

La décision la plus importante à prendre concernait le mode de refroidissement du cœur du réacteur : eau ordinaire ou eau lourde. Dans l'instrument présenté à Genève, ce refroidissement était assuré par de l'eau ordinaire. Ce choix était la conséquence logique de l'option pile piscine choisie.

⁴ Heinz Beckurts travailla plus tard chez Siemens et fut assassiné en juillet 1986 par la fraction Armée rouge.

Mais l'eau lourde présente des avantages certains. Ces avantages résultent essentiellement des meilleures propriétés neutroniques du deutérium comparé à l'hydrogène. Il a une section efficace de capture environ mille fois plus faible. Il est ici utile d'introduire la notion de réactivité. Au cours de la fission, environ deux neutrons sont émis par noyau d'uranium 235. Pour qu'une réaction en chaîne puisse se développer, il faut qu'un neutron au moins ait la possibilité d'induire une nouvelle fission. Or des neutrons sont perdus, soit parce qu'ils sont absorbés dans les matériaux du réacteur, soit parce qu'ils s'échappent hors du réacteur. Ce dernier facteur de perte conduit à la notion de masse ou de taille critique qu'il faut atteindre pour que la réduction de ces pertes permette la réaction en chaîne. Cette masse critique est réduite par l'utilisation d'un réflecteur qui renvoie, par rétrodiffusion, une partie des neutrons qui, sans lui, seraient perdus pour la réaction en chaîne. Quant la réaction en chaîne est établie, on appelle réactivité l'excès au-delà de 1 des neutrons qui induisent une nouvelle fission. En fonctionnement continu, cette réactivité est nulle et l'on pilote le réacteur en y introduisant ou en retirant des matériaux absorbants.

Il est bien évident que le remplacement de l'eau ordinaire par de l'eau lourde pour le refroidissement du cœur du réacteur donne une plus grande marge de sécurité pour le fonctionnement. En particulier, en cas de redémarrage après un arrêt, il y a accumulation de xénon⁵. Avec un refroidissement avec de l'eau ordinaire, il faut attendre environ 36 heures que l'empoisonnement soit terminé ou au moins considérablement réduit. Dans un réacteur refroidi par de l'eau lourde, la marge de réactivité permet de le faire à tout moment. Ce point a une certaine importance en cas d'arrêt intempestif du réacteur (dû par exemple à une panne de l'alimentation en électricité). Comme il y a moins de neutrons capturés par l'eau de refroidissement du cœur, à puissance égale il y a un peu plus de neutrons dans le réflecteur là où vont aboutir les canaux expérimentaux, donc plus de neutrons pour les expériences, ce qui était un argument d'un certain poids. De plus, le maximum du flux de neutrons thermiques est un peu plus loin du cœur, ce qui permet de mettre en place un plus grand nombre de canaux expérimentaux, qui regardent cette zone. Mais les témoignages recueillis aujourd'hui suggèrent que l'idée de faire circuler à haut débit de l'eau sous pression

⁵ Parmi les produits de fission, il y a le xénon 135 qui absorbe très fortement les neutrons et dont le temps de vie est de 9,2 heures.

dans un combustible immergé dans un bidon réflecteur plein d'eau lourde faisait peur (comment être absolument sûr de l'étanchéité entre ces deux milieux) et que ce fut la motivation principale du choix du refroidissement par l'eau lourde.

La solution avec l'eau lourde est donc meilleure. Mais le choix de l'eau lourde entraîne une augmentation du coût du réacteur (en grande partie à cause de la plus grande quantité d'eau lourde requise), estimée à l'époque à 20 millions de francs⁶, soit environ 10 % de ce coût.

Le budget de construction du réacteur pour l'option eau ordinaire était estimé (réunion du 12 janvier 1967) à 228 millions de francs répartis comme suit :

– réacteur avec refroidissement à l'eau ordinaire	102 MF
– aménagement du site	17,5 MF
– bâtiment réacteur	10 MF
– équipements	48,5 MF
– prestation du CEA	20 MF
– personnel (40 personnes pendant 4 ans)	10 MF
– aléas économiques	20 MF
– supplément pour refroidissement à l'eau lourde	20 MF

Par ailleurs, techniquement, un refroidissement à l'eau ordinaire est plus facile à mettre en œuvre dans une pile piscine. Pour cette raison, et à cause de l'expérience acquise sur le réacteur Siloe, le CENG essaya d'imposer le choix du refroidissement à l'eau ordinaire. Beckurts était un partisan résolu de l'option eau lourde, soutenu par Kouts et Dautray. La difficulté de la mise en œuvre de cette solution est accrue dans le réacteur de Grenoble pour lequel les futurs utilisateurs avaient demandé que les canaux expérimentaux soient démontables de telle sorte que la configuration du réacteur et de ses expériences ne soit pas figée une fois pour toutes. Cela imposait la mise en place de joints assurant les étanchéités requises (mais dans ce cas entre milieux à la pression atmosphérique). Nos amis de Brookhaven pensaient que cette démontabilité serait impossible à réaliser.

Une conférence fut organisée du 19 au 23 septembre 1966 à Santa Fe (Nouveau-Mexique, États-Unis) par la commission de l'énergie atomique des États-Unis. Au cours de cette conférence furent comparées les diverses possibilités de sources intenses de neutrons (réacteurs continus et réacteurs pulsés ainsi que les sources n'utilisant pas la fission). Dans un rapport introductif, Robert Dautray présenta l'ensemble des réacteurs

⁶ À cette époque, la valeur du franc était approximativement celle de l'euro actuel.

haut flux alors en fonctionnement (HFBR de Brookhaven), en construction ou à l'étude (le réacteur d'irradiation HFIR d'Oak Ridge, le projet britannique et le projet franco-allemand de Grenoble ainsi qu'une expérience de fonctionnement temporaire à haut flux de l'un des réacteurs de Savannah River). Après cette comparaison, qui permettait de mieux saisir les limitations des réacteurs continus, chacun d'eux fut présenté en détail. Le projet du futur ILL fut présenté par Robert Dautray et Karl Beckurts, les deux options eau lourde avaient été comparées. Dans leurs conclusions, ils notaient ceci :

« Our study has revealed that the design objectives can be met by both the H₂O and the D₂O cooled version. There are many features common to both versions. There are, however, characteristic differences : the H₂O-version has a simpler cooling circuit, offers simpler fuel handling and is less expensive, it will also be somewhat simpler to operate. The D₂O-version a larger high-flux volume available for experiments and somewhat lower backgrounds. The fuel is at a lower temperature level, making a later increase of flux and power possible, and the problem of the core shroud⁷ is less severe. The fuel cycle costs will be slightly lower, partly due to lower power, partly due to the longer duration of the fuel cycle. On the basis of the results of this study, the steering committee of the project will make a decision on the coolant medium within the very near future. After this the preliminary design can be rapidly completed and it is hoped to pass some design contracts to industry in the not too distant future. Scheduled completion date for the reactor is late 1971. »

Donc pas de conclusions définitives ; mais Dautray et Beckurts, appuyés par Kouts, le père du réacteur de Brookhaven, étaient favorables à l'option eau lourde qui est meilleure pour les utilisateurs. Ce choix fut violemment reproché à Dautray⁸ par le CENG, mais fut après coup soutenu par Horowitz.

Mais ce choix n'était pas encore définitif et dans sa première réunion le 19 janvier 1967, le comité de direction (CD) eut encore une discussion à ce sujet, la partie allemande insistant sur l'objectif de réaliser le meilleur réacteur possible, c'est-à-dire avec un refroidissement à l'eau lourde. La décision finale fut prise lors du comité directeur suivant, le 16 mars 1967. La réalisation et 35 ans de fonctionnement, sans incidents liés à la

⁷ Il s'agit de la paroi qui sépare l'eau légère de refroidissement qui est sous une pression de 12 bars de l'eau lourde du réflecteur qui est au environ de la pression atmosphérique.

⁸ Information communiquée par Dautray.

coexistence de l'eau lourde avec l'eau ordinaire, ont démontré que c'était une sage décision. La possibilité de démonter les canaux, prise à la demande des utilisateurs, s'est avérée fort utile quant on s'est aperçu que, après une dizaine d'années, sous l'effet du rayonnement, l'aluminium choisi pour la réalisation des canaux devenait fragile. Il était donc indispensable de procéder à leur remplacement, ce que permettait la conception du réacteur. Cette fragilisation de l'aluminium soumis au rayonnement dans le réacteur avait été prise en compte dans le projet. En effet, Dautray avait demandé que soit analysé le caisson du réacteur Pégase, fonctionnant à Cadarache et d'extrapoler les résultats pour prévoir la tenue de ce matériau dans le réacteur haut flux. Le matériau utilisé était l'alliage aluminium-magnésium AG3 NET. Le résultat de ces études fut qu'il faudrait prévoir un remplacement du bloc-pile⁹ tous les cinq ans. Le réacteur a été conçu pour permettre un tel remplacement. Cette fragilité de l'aluminium fortement irradié est bien développée dans le rapport de la conférence de Santa Fe. Maintenant l'ILL étudie l'utilisation éventuelle du zircaloy.

Bâtiment réacteur

Le choix du fluide refroidissant était de première importance, car il avait des implications sur presque toutes les parties du réacteur. Les décisions concernant le bâtiment étaient moins lourdes de conséquences. Mais Maier-Leibnitz attachait beaucoup d'importance à ce point. Le bâtiment abritant le réacteur de Munich était et reste très élégant avec sa forme de tête de fusée (les Allemands parlent d'œuf). Maier-Leibnitz souhaitait que celui de Grenoble fut aussi beau. Par ailleurs, il souhaitait que certaines expériences un peu encombrantes trouvent leur place à l'intérieur du bâtiment. Comme d'autres expériences exigeaient moins de place, il demanda avec insistance que la pile fut excentrée dans le bâtiment. De fait, dans le projet présenté à Santa Fe, le réacteur est complètement excentré. Ceci aurait entraîné une très grande difficulté à mettre en place des moyens de manutention adéquats (pont roulant). Il y eut à ce sujet d'âpres et stériles discussions qui durèrent encore en avril 1967. Finalement il fut décidé de faire un très grand bâtiment, de 60 mètres de diamètre, qui assuraient les 25 mètres entre réacteur et bâtiment réclamés par Maier-Leibnitz ; c'est sans doute un record mondial. L'esthétique fut elle aussi

⁹ On appelle bloc-pile l'ensemble constitué par l'élément combustible, le bidon réflecteur contenant l'eau lourde, les canaux qui aboutissent à l'élément combustible et les sources intégrées (source froide et source chaude).

sacrifiée aux impératifs technologiques. Le nouveau réacteur construit récemment à Garching n'a pas lui non plus la beauté de son aîné. Je vois dans mes notes que lors d'une réunion avec Chatoux, le 1^{er} février 1968, Maier-Leibnitz insistait encore sur la nécessité d'étudier un bâtiment autoporteur comme l'était celui de Garching.

Un autre problème concernant le bâtiment était celui de son étanchéité. Ce point fut longuement discuté lors d'une réunion à Munich le 6 juin 1966 à laquelle participait Kouts. Pour ce dernier, il fallait prendre en compte une éventuelle fusion de l'élément combustible (en fait il n'y en pas eu à ce jour). Il était donc essentiel que le bâtiment soit parfaitement étanche et puisse supporter une surpression de 1/7 d'atmosphère. Pour Kouts, ceci était particulièrement important à Grenoble à cause de la proximité des habitations. Dautray exprima son accord total sur ce point. Cette étanchéité est assurée par une double enceinte : une enceinte intérieure de 40 cm en béton armé et une enceinte extérieure en acier de 11 mm, reposant sur une partie enterrée, elle-même en béton. Cette double enceinte est maintenant prévue dans les réacteurs producteurs d'électricité.

Problèmes divers

Il faut bien réaliser que le réacteur haut flux de Grenoble est le fruit de toute une série de prouesses techniques. La puissance spécifique moyenne est de 1,15 MW/litre, montant au point chaud jusqu'à 3,3 MW/litre, des valeurs très supérieures à celles existant dans un réacteur producteur d'électricité. La conception du cœur était donc de première importance. La conception du cœur du réacteur d'Oak Ridge HFIR (*High Flux Isotope Reactor*) a été reprise. Dans ce réacteur américain, qui a comme but de faire des irradiations en pile avec le flux le plus élevé possible, le cœur, de forme cylindrique, est monobloc avec une cavité centrale pour ces irradiations. Dans le cas de Grenoble, cette cavité sert à loger la barre de contrôle (comme dans le brevet de pile piscine déposé par Horowitz et Raievski en 1960). Les divers paramètres du réacteur seront donnés plus loin, quand je parlerai de sa construction.

Futurs utilisateurs

Maier-Leibnitz et moi-même furent chargés de la discussion avec les futurs utilisateurs. Il y eut toujours, en particulier dans

ce domaine, une concertation avec Louis Néel auquel Maier-Leibnitz rendit visite au tout début de 1965. La conception que Maier-Leibnitz avait de l'Institut, et à laquelle j'adhérais totalement, était à cette époque originale. Il s'agissait de construire une pile et les instruments destinés à faire usage des faisceaux de neutrons pour être utilisés principalement par des visiteurs venant des différents laboratoires de France et d'Allemagne. Ces visiteurs n'ayant pas le plus souvent d'expérience antérieure de l'utilisation des neutrons, il était donc indispensable que l'Institut ait une équipe de chercheurs chargés dans un premier temps de construire les instruments et ensuite d'aider les visiteurs comme collaborateurs (ce que l'on a appelé en français « local-contact »). Mais corrélativement, il était nécessaire d'associer la communauté scientifique au choix des instruments à construire.

Cette construction devait commencer au même moment que celle du réacteur pour que les instruments soient prêts à temps. Il fallait donc consulter cette communauté en même temps que le projet de réacteur était finalisé. D'après mes archives, la première réunion de ce type s'est tenue les 3 et 4 mai 1965, donc bien avant la création officielle de l'ILL, à Spitzingsee, une station dans la montagne à 65 km de Munich. La suivante s'est tenue à Saclay les 14 et 15 septembre 1965. À ces premières réunions participaient des chercheurs ayant une certaine expérience de l'utilisation des neutrons comme Bertaut et Springer, mais aussi des chercheurs qui n'avaient pas cette expérience, mais d'une grande compétence scientifique. Je me souviens du côté français de Jacques Friedel et André Guinier, créateurs du laboratoire de physique du solide à Orsay. En somme, c'était une ébauche de ce qui deviendrait le conseil scientifique de l'ILL.

La grande diversité des applications des neutrons conduisit rapidement à la création de groupes spécialisés travaillant à la définition des instruments pour respectivement la diffraction, la diffusion inélastique et la physique nucléaire. J'y reviendrai plus loin.

Contrat

La construction d'un réacteur d'un coût estimé à quelque 200 millions de francs et celle d'un institut franco-allemand avec un personnel devant un jour atteindre le chiffre de plusieurs centaines de personnes, nécessitait un cadre juridique précis.

Ce cadre juridique est défini par deux textes, une convention et des statuts.

Convention entre le gouvernement français et allemand

La convention signée entre les deux gouvernements disait :

« Le gouvernement de la république française et le gouvernement de la république fédérale d'Allemagne, soucieux de poursuivre la mise en application des dispositions du traité franco-allemand du 22 janvier 1963¹⁰, en particulier de celles relatives au développement de la coopération scientifique entre les deux pays ; considérant l'intérêt des recherches qui ont déjà été effectuées tant en France qu'en République fédérale d'Allemagne dans le domaine de la physique nucléaire et de la physique du solide ; constatant qu'en Europe des installations nouvelles sont nécessaires au développement de ces recherches ; désireux que d'autres États européens puissent participer aux actions qu'ils se proposent d'entreprendre en commun, ont décidé de promouvoir la construction et l'exploitation à des fins pacifiques d'un réacteur à très haut flux de neutrons et sont en conséquence convenus des dispositions suivantes.

Les deux gouvernements s'engagent à mettre à la disposition des associés :

- d'une part, une somme de 163 millions de francs français (132 millions de DEM) destinée à couvrir les dépenses de construction du réacteur ;*
- d'autre part, et à concurrence de 43 millions de francs français (35 millions de DEM) une subvention annuelle destinée à couvrir les dépenses d'exploitation ».*

Le texte complet de cette convention est reproduit en annexe (annexe 1).

Ces dispositions précisent que l'exploitation du réacteur, objet de la convention, est confiée à une société civile¹¹ dont les associés sont le Commissariat à l'énergie atomique, le Centre national de la recherche scientifique et la Gesellschaft für Kernforschung m.b.H de Karlsruhe (GFK). Cette société est désignée sous le nom d'« Institut Max von Laue-Paul Langevin ».

¹⁰ Communément nommé traité de l'Élysée.

¹¹ Le ministère français des Affaires étrangères était opposé à ce que cette responsabilité soit confiée à une société civile. Heureusement, le ministre (M. Couve de Murville) était favorable au projet.



Figure 4.2. Signature de la convention créant l'Institut Max von Laue-Paul Langevin. On voit au fond les deux ministres (M. Peyrefitte et M. Stoltenberg) ; derrière, à gauche, Francis Perrin alors haut-commissaire du CEA ; au premier plan, à gauche Horowitz avec à sa droite Anatole Abragam ; à droite, Eisermann (chef de projet adjoint), avec derrière lui le haut de la tête de Maier-Leibnitz.

Il est précisé qu'elle n'entreprend d'activités qu'à des fins pacifiques et que son directeur doit être une haute personnalité scientifique proposée par l'associé allemand. Cette convention fut signée le 19 janvier 1967 à Grenoble par les ministres compétents, à savoir Monsieur Stoltenberg et Monsieur Peyrefitte (fig. 4.2).

Quelques commentaires sur ce texte sont utiles. Le premier est que la partie française est une association entre le CEA et le CNRS. Je pense que cette introduction du CNRS est due à une initiative de Néel, car elle est conforme à la politique d'associer le CEA et le CNRS, qui fut toujours la sienne à Grenoble. Dans son livre de souvenirs Néel parle des contacts (sans qu'il précise qui étaient ses interlocuteurs) qu'il eut en 1966 avec la direction du CNRS. Le directeur général, le professeur Jacquinet, y était certainement favorable. Si certains autres responsables du CNRS (je pense à Hubert Curien, qui était à l'époque directeur du département de physique) étaient d'accord, le CNRS en tant que corps de chercheurs ne s'est joint à l'entreprise que contraint et forcé. Ceci ne faisait que traduire une certaine hostilité d'une partie de la communauté scientifique, essentiellement composée de chercheurs de la physique légère effrayés par les coûts de l'ILL, qui transforma vite « réacteur à haut flux » en « réacteur superflu ». Ces réserves d'une partie de la communauté scientifique française furent reprises dans un article, très tendancieux, publié par l'hebdomadaire *L'Express* le 26 septembre 1971, intitulé « Une expérience pour

rien ». Cette hostilité s'est assez vite dissipée quand les physiciens comprirent que ce nouvel instrument, à la différence des réacteurs de Saclay, ne servait pas qu'une communauté réduite de spécialistes, mais pouvait leur être utile. Le bilan pour le CNRS et l'ILL me paraît globalement positif. La plupart des utilisateurs français sont venus de laboratoires du CNRS.

Le deuxième commentaire concerne l'intitulé de l'Institut. À l'origine, Maier-Leibnitz avait proposé de le nommer Institut Langevin¹² Laue¹³, puis Institut Laue-Langevin. Ce dernier intitulé fut refusé par la partie française à cause du passé procommuniste de Langevin, dont le nom ne fut considéré comme acceptable que s'il était accompagné de son prénom¹⁴. D'où l'intitulé officiel actuel. Mais, point remarquable, il faut noter que dans les deux textes signés le 19 juin 1967, l'institut auquel ces textes donnaient naissance est appelé dans la convention, signée par les ministres, « Institut Max von Laue-Paul Langevin », alors que dans les statuts, signés par les responsables des associés, il est dénommé « Institut Paul Langevin-Max von Laue ». Il fut remédié à cette anomalie dans l'avenant aux statuts signé le 19 juillet 1974 à l'occasion de la venue du troisième associé, le SRC.

L'usage, négligeant ces médiocres arguties politico-scientifiques, a supprimé les prénoms et l'Institut est appelé simplement par tous « ILL ».

Une autre remarque concerne la restriction très saine de limiter les activités de l'ILL à des activités purement pacifiques. Cette clause fut incluse à la demande des Allemands (réunion du 28 juin 1966). L'ILL a une unité de détritiation de l'eau lourde et est donc producteur de relativement grandes quantités de tritium. Les utilisations civiles du tritium ont presque complètement disparu. Cet isotope est donc difficile à vendre. Par contre ses utilisations militaires (pour la bombe à hydrogène) lui donnent une grande valeur sur ce marché auquel cette clause de la convention lui interdit l'accès. Avec le projet ITER destiné à tester l'utilisation de la fusion nucléaire pour produire de l'énergie, ce tritium peut retrouver un débouché civil.

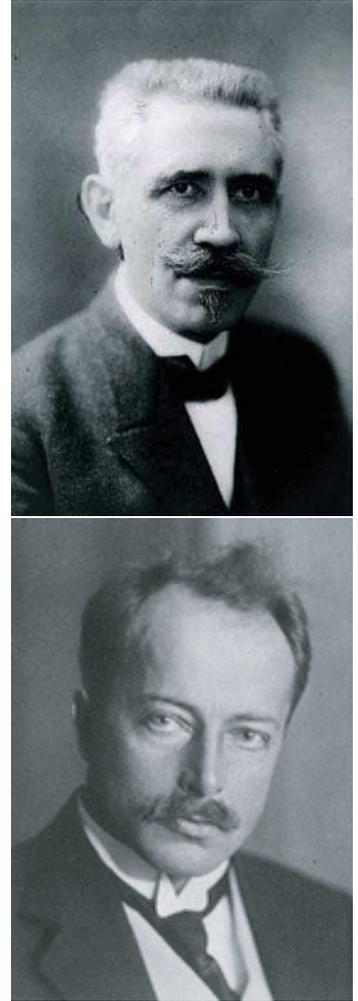


Figure 4.3. Paul Langevin (photo en haut) et Max von Laue (photo en bas).

¹² Paul Langevin (1872-1946), physicien français, inventeur du sonar. Il travailla sur la relativité et sur le magnétisme.

¹³ Max von Laue (1879-1960), physicien allemand qui découvrit la diffraction des rayons X par les cristaux, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1914.

¹⁴ Ceci repose sur des souvenirs personnels et je ne possède aucun document sur ce problème des prénoms.

Enfin, dernier point important, le fait que la société ILL soit une société civile de droit français avait, et a toujours, comme conséquence l'application du code du travail français, avec en particulier un comité d'entreprise et des délégués du personnel, et également le fait que le personnel paie des impôts. Ceci représente une grande différence avec les cas du CERN ou de l'EMBL, qui ont un statut d'organismes internationaux, institutions dont le personnel ne paie pas d'impôts. Il est certain que le statut de société civile avec des rémunérations analogues à celles du personnel du CEA voisin a beaucoup facilité les rapports entre les chercheurs de l'ILL et ceux du CENG.

L'augmentation des dépenses résultant de l'inflation, alors très importante, nécessita d'ajouter un avenant à cette convention. Cet avenant, signé le 6 juillet 1971 peu avant la mise en route du réacteur, stipule « *qu'une somme de 335 millions de francs est mise à disposition pour les dépenses de réalisation de l'installation, comprenant le réacteur, les dispositifs expérimentaux et les dépenses d'exploitation de l'Institut pendant la phase d'études et de construction* ». Notons que cet avenant prend bien en compte le fait, auquel Maier-Leibnitz était très attaché, que les dispositifs expérimentaux devaient être construits en même temps que le réacteur. Cet avenant évoque aussi « *une subvention annuelle destinée à couvrir les dépenses d'exploitation plafonnées à 53 millions de francs français pour la première année de la phase de fonctionnement normale qui sera 1972 au plus tôt* ». Je reviendrai plus loin sur les divers ajustements qui furent faits à cette convention au cours de la vie de l'ILL.

Statut de la société Institut Paul Langevin-Max von Laue

Le deuxième texte est celui des statuts de la société « Institut Paul Langevin-Max von Laue » qui fut lui aussi signé le 19 janvier 1967 entre les représentants des trois associés, la GFK, le CNRS et le CEA. Ces statuts créent les organes de la société, le comité de direction (émanation des associés), le directeur et la commission de contrôle de la comptabilité (fig. 4.4). Ils créent aussi un conseil scientifique et précisent le rôle de chacun de ces organes. Pour les Allemands, un directeur est un directeur avec pleins pouvoirs. Il était donc essentiel pour la partie allemande que ce conseil ait un rôle purement consultatif. Un compromis fut trouvé supprimant à la fois la voie prépondérante du directeur et le droit de veto du conseil. Dans la réalité de la vie de l'ILL, il n'y a jamais eu, à ma connaissance, de



Figure 4.4. Sur cette photographie, prise lors de l'une des premières réunions du comité de direction, figurent Hasenclever (debout) avec devant lui L. Néel et P. Balligand.

conflits entre les directeurs successifs et le conseil scientifique. À l'origine, ce conseil était présidé par le directeur ; depuis les années 1990, il est présidé par l'un de ses membres nommé par la direction de l'ILL. Bill Stirling fut le premier président ainsi nommé.

La première réunion du comité de direction a eu lieu dès le 6 janvier 1967 à Bad Godesberg, c'est-à-dire avant même que la société ne soit officiellement créée. Au cours de cette réunion furent nommés le président de ce comité (Prestch), le vice-président (Néel), le premier secrétaire (Balligand), le deuxième secrétaire (Hasenclever (fig. 4.5)), le directeur (Maier-Leibnitz), le directeur adjoint (Jacrot), le chef de projet (Dautray) et le chef de projet adjoint (Eisermann). Ainsi fut officialisée l'équipe qui allait bâtir l'ILL et son réacteur. Les membres du conseil scientifique furent aussi nommés, avec pour la France Bertaut, Cribier, Dautreppe, Dreyfus, Herpin, Guinier, Moussa et Niefenecker et pour l'Allemagne Armbruster, Beckurts, Dachs, Fiebinger, Fulde, Springer et Wiedemann. Des premières propositions furent faites pour le choix de l'architecte industriel. Enfin fut abordée la nécessité pour la direction de l'Institut et le chef de projet de disposer d'un budget.

Ce fut l'une des tâches du comité lors de ses seconde et troisième réunions tenues toutes les deux à Paris respectivement les 16 et 17 mars et les 3 et 4 juillet. Le budget pour 1967 fut établi à 47,2 millions de francs se répartissant de la façon suivante :



Figure 4.5. Wolfgang Hasenclever.

- Dépenses de fonctionnement	7 MF, dont 4,8 MF pour l'équipe projet
- Site et infrastructure	5,2 MF
- Bâtiments	9,8 MF
- Réacteur	22,3 MF
- Dispositifs expérimentaux	1,8 MF
- Imprévus	1 MF

Le budget de l'équipe projet est pour une équipe de 43 personnes dans l'équipe de base plus une trentaine d'autres sous contrat. Le budget « bâtiments » portait sur l'ensemble des bâtiments. Lors du comité de mars, l'engagement de 11,1 MF avait été autorisé. C'est aussi au cours de ce comité que fut approuvée la nomination de M. Hasenclever comme chef des services administratifs de l'ILL. Ce dernier, âgé de 35 ans, venait de Jülich. Il est présent à temps plein à Grenoble à partir de juillet 1967. L'expérience a montré que le choix fait par Maier-Leibnitz était heureux et le succès de l'ILL doit certainement beaucoup à Hasenclever qui a toujours su être ferme tout étant à l'écoute du personnel.

Au cours de la réunion de juillet 1967, le budget présenté par l'Institut fut approuvé. Au cours de cette réunion fut aussi entériné le remplacement de Dautray (appelé à d'autres responsabilités au CEA) par Jean Chatoux comme chef de projet. Je me souviens de mes craintes à ce sujet. Dautray avait été excellent et je ne connaissais alors que très peu son remplaçant. Dautray m'avait alors dit qu'il pensait que Chatoux serait meilleur que lui dans la phase de construction. Je ne sais pas ce qui se serait passé avec Dautray, mais Chatoux a certainement été excellent.

Il serait fastidieux de passer en revue les diverses réunions du comité de direction et du conseil scientifique qui se sont tenues pendant toute la période du projet et de la construction aboutissant à la divergence du réacteur le 31 août 1971 et à la pleine puissance en décembre de la même année. Ces réunions pour le comité de direction avaient lieu au moins deux fois par an et même quatre fois par an durant les années de construction.

Chapitre 5

Construction du réacteur et constitution des équipes scientifiques

La vie de l'Institut a débuté en mai 1967 dans quelques pièces mises à notre disposition au CENG. Le rapport rédigé par le directeur de l'Institut pour l'année 1967 précise qu'à la fin de l'année, il y avait dix personnes (dont sept scientifiques, y compris deux boursiers de thèse) travaillant à Grenoble (dont deux partiellement à Saclay) et six à Munich. En effet Maier-Leibnitz avait beaucoup insisté pour la création temporaire d'un groupe de théoriciens implantés à Munich, en attendant que cette activité puisse se développer à Grenoble. L'année 1968 est particulièrement intéressante. Il y eut un important accroissement du personnel qui comptait déjà, au 1^{er} mars 1969, 48 personnes à Grenoble. Dans les rapports que rédigèrent plus tard les représentants du SRC, ils attribuent une grande partie du succès de l'ILL au fait que le recrutement des futurs responsables fut fait suffisamment tôt. J'ai déjà parlé de l'embauche de Hasenclever qui put organiser dès les débuts l'administration de l'ILL. Il put aussi contribuer aux relations entre la direction de l'Institut et le comité de direction. Le responsable de l'ensemble des services techniques, Michel Jacquemain, fut recruté dès septembre 1967. Le futur chef de service du réacteur, Yves Droulers le fut en avril 1968. Tous deux venaient du service réacteur du CENG. Ils jouèrent un rôle important dans les relations avec le groupe projet (voir plus loin).

À la fin de cette même année, Maier-Leibnitz rédigea pour le comité de direction un texte intitulé « Le rôle du réacteur à haut flux dans la recherche de la matière solide et liquide »¹.

¹ Le texte complet de ce rapport est reproduit en annexe (annexe 2).

Il commence par émettre des critiques sur la façon dont est menée cette recherche à Oak Ridge et à Brookhaven et fait les critiques suivantes sur ces deux réacteurs et leur utilisation :

- ces réacteurs ne sont pas totalement consacrés à la recherche utilisant les faisceaux sortis (sauf à Brookhaven) et donc pas optimisés pour ce type de recherche ;
- les expériences sont réalisées par des spécialistes de la physique des neutrons et pas par des physiciens du solide ;
- faiblesse de la physique théorique auprès des réacteurs ;
- nombre trop faible de physiciens autour des réacteurs ;
- absence de structure d'accueil pour les visiteurs scientifiques ;
- des équipements très conservateurs et non optimisés.

Ces considérations sont suivies de la liste des avantages des installations de l'ILL et de propositions pour éviter à l'ILL de souffrir des défauts observés ailleurs. Ces propositions sont importantes car elles ont permis de définir ce que devait être l'ILL. Dans la pratique, l'essentiel de ces propositions a été suivi de réalisations effectives.

Les avantages spécifiques attendus du réacteur de l'ILL sont les suivants :

- C'est un réacteur conçu de façon prioritaire pour l'utilisation des faisceaux sortis de neutrons.
- Avec son diamètre de 60 m, il permet aux physiciens de disposer de plus de place pour leurs expériences. Le niveau des expériences est celui d'un remblai à l'extérieur, ce qui permet de laisser passer les faisceaux de neutrons à l'extérieur du bâtiment et d'avoir, grâce aux guides de neutrons, des dispositifs expérimentaux à grande distance du cœur du réacteur, donc dans une zone où le bruit de fond est réduit.
- *« Le réacteur avec sa protection, les conduits de neutrons, la source froide et la source chaude ont été projetés en coopération avec les expérimentateurs, futurs utilisateurs du réacteur. . . Nous espérons pouvoir installer un nombre optimum d'expériences (peut-être 40) autour du réacteur. »*

Maier-Leibnitz détaille alors l'organisation du travail scientifique qu'il considère comme nécessaire pour pouvoir faire le meilleur usage de ces avantages inhérents à la conception même du réacteur de Grenoble :

- un nombre de chercheurs d'environ 200 dont 50 à 70 % de visiteurs ;
- un budget annuel, hors réacteur, de 25 millions de francs ;
- disposer d'un bureau d'études et d'un atelier, tout en coopérant avec le CENG et les laboratoires CNRS de Grenoble ;
- avoir une structure d'accueil permettant d'assurer toute l'assistance nécessaire aux visiteurs ;
- un groupe de théoriciens.

Tout cela a été réalisé et a permis le succès de l'ILL. Un autre point dans l'organisation scientifique n'est pas évoqué dans ce texte de Maier-Leibnitz mais a, lui aussi, joué un rôle dans ce succès. C'est l'absence d'une structure hiérarchique rigide. Il n'y a jamais eu un service de physique nucléaire avec son chef de service et des locaux spécifiquement attribués. Dès le début, un collège de physique nucléaire a regroupé les physiciens s'occupant des instruments travaillant dans ce domaine. Le terme « collège » apparaît dès le rapport d'activité de 1971 pour décrire l'activité scientifique de l'institut naissant. Ces collèges ont pour fonction de travailler à la construction des instruments décidés par les divers sous-comités du conseil scientifique et destinés à leur utilisation. Il y a ainsi 10 collèges :

- collège 1 : théorie à Garching (Munich) ;
- collège 2 : théorie à Grenoble ;
- collège 3 : physique nucléaire ;
- collège 4 : propriétés des cristaux purs ;
- collège 5 : structures cristallographiques et magnétiques ;
- collège 6 : liquides, gaz, et substances amorphes ;
- collège 7 : imperfections dans les cristaux ;
- collège 8/9 : biologie et polymères, chimie ;
- collège 10 : nouveaux projets.

Cette structure en collèges, mise en place par Maier-Leibnitz pour encourager la discussion entre scientifiques travaillant à la construction des instruments destinés à répondre aux questions scientifiques posées dans les divers domaines mentionnés dans l'intitulé des collèges, s'est imposée tout naturellement comme celle permettant à la fois une vie scientifique de l'Institut et la collaboration avec les chercheurs visiteurs. Il est intéressant de noter que la liste et la numérotation des collèges est restée jusqu'à aujourd'hui à peu près la même, sauf pour le collège 1 qui a disparu avec le groupe de Munich. De ce fait, cette liste a pendant longtemps débuté par le collège 2. Plus récemment, un collège 1 a été créé pour l'instrumentation. Les intitulés ont quelque peu changé pour tenir compte de l'évolution des thèmes. Très tôt, il a fallu qu'un physicien assume un minimum de travail d'organisation. Un secrétaire du collège fut ainsi coopté par ses membres. Plus tard cette cooptation fut remplacée par une élection formelle. Ce secrétaire reçoit une petite prime (200 francs mensuels lors de la création de cette fonction) et dispose d'un petit budget lui permettant d'inviter des orateurs pour des séminaires et de faire quelques petits achats.

Cette absence de hiérarchie rigide et la jeunesse de la plupart des acteurs permit de créer une atmosphère à la fois studieuse et détendue. Le travail très intense était compensé par des fêtes plus ou moins improvisées. Le *fasching*, le carnaval allemand, était bien entendu célébré sur place avec la participation très active de Maier-Leibnitz et de son épouse. Mais il y avait aussi des moments de détente totalement improvisés. Ainsi entre midi et deux heures un groupe pouvait partir skier dans le Vercors. À cette époque, il n'y avait pas de bouchons mais de la neige à basse altitude. Un ancien de cette époque qualifie cette ambiance de « très jeune étudiant ».

Les premiers pas concrets pour la mise en œuvre du programme de Maier-Leibnitz furent faits en 1968. Guy Gobert qui avait travaillé avec moi à Saclay vint pour s'occuper du bureau d'études. Reinhart Scherm et Bernd Maier, deux physiciens allemands confirmés, vinrent la même année. Avec l'aide du conseil scientifique et de ses divers sous-comités, le choix fut alors fait des premiers appareils à réaliser. Mais ce n'est qu'en 1969 que leur construction a pu commencer, l'objectif étant d'avoir environ la moitié des équipements prêts quand le réacteur serait opérationnel.

En effet ce n'est que le 1^{er} mars 1969 que l'ILL disposa de son premier bâtiment (justement nommé ILL1) d'une surface de 1 200 mètres carrés. Une des premières installations dans

ce bâtiment fut celle d'une bibliothèque qui nous paraissait essentielle à une vie scientifique. Christine Castets fut recrutée pour s'en occuper.

Il nous parut aussi indispensable de mettre à la disposition des premiers physiciens des équipements permettant d'attendre les faisceaux de neutrons. Il y eut d'abord un laser permettant d'étudier la diffusion Brillouin qui donne des informations complémentaires à celles obtenues par diffusion inélastique des neutrons. Reinhard Scherm, avec une étudiante, Anne Hamelin, mit en place l'installation et s'en occupa. Plus tard (en 1970), un diffractomètre rayons X à quatre cercles fut mis en place en collaboration avec Janine Lajzerovitz de l'université de Grenoble. Ceci a permis de familiariser les physiciens à la cristallographie. Michel Thomas s'en occupa. L'arrivée de Jacques Villain, venu de Saclay, en septembre 1969, permit de démarrer la physique théorique à Grenoble. Cette arrivée fut aussi importante, car elle compensait la difficulté et même l'impossibilité d'attirer des physiciens expérimentateurs de Saclay. Cette impossibilité, que j'attribue au parisianisme de collègues qui avaient tendance à penser qu'il n'y avait rien de bon en dehors de la région parisienne, contrastait avec l'attrait qu'eut, dès le début, l'ILL pour les physiciens allemands. Un autre signe de la vie scientifique de l'ILL fut l'organisation du 20 septembre au 10 octobre 1969 d'une école d'été sur l'utilisation des neutrons. Cette école se tint à Saint Maximin dans le cloître de la superbe église de cette petite ville provençale. Pierre-Gilles de Gennes, Sjölander et Brenig, entre autres, firent partie du corps enseignant.

Au cours de l'année 1970 le personnel passa de 106 en 1969 à 216, répartis comme suit.

	Total	Français	Allemands	Divers
Cadres	81	36	35	10
Thésards	24	15	6	3
Chercheurs invités	11	3	2	6
Divers	100	87	11	2

Ce tableau met en évidence un problème que l'ILL a rencontré dès sa création et qui n'a pas pu encore être complètement résolu. Le rapport annuel pour 1970 en fait l'analyse suivante :

« L'ILL continue à avoir des difficultés pour le recrutement du personnel allemand de niveau non universitaire. La raison en est qu'en général, ouvriers, employés de laboratoire, programmeurs, techniciens et ingénieurs non diplômés ont peu

de connaissances d'une langue étrangère et rencontrent de ce fait de plus grandes difficultés d'adaptation. Le principal obstacle est cependant que cette catégorie de personnel, selon la grille ILL, ne peut percevoir des rémunérations aussi élevées qu'en République fédérale allemande. Les règlements, concernant les indemnités, adoptés par le comité de direction lors de sa 8^e réunion du 14 avril 1970 sont donc insuffisants et nécessitent une amélioration. »

Le problème posé par une prime de dépaysement insuffisante pour les techniciens a été l'objet de nombreuses discussions au sein du comité directeur.

J'ai noté plus haut qu'il se posait, pour de toutes autres raisons, un problème symétrique pour les chercheurs. Il était impossible d'attirer à Grenoble des physiciens de Saclay, ce qui en cette période de construction où une expertise dans l'utilisation des neutrons (expertise n'existant en France qu'à Saclay et au CENG de Grenoble) semblait nécessaire, rendait difficile le recrutement de chercheurs français. Ce fut un vrai casse-tête. Finalement, plusieurs Français venus d'horizon divers, sans aucune expérience des neutrons, furent tentés par l'aventure de l'ILL. Je pense à Roland Currat qui avait soutenu une thèse au MIT (États-Unis), à José Dianoux un physico-chimiste qui avait déjà obtenu un poste permanent au CNRS, poste qu'il laissa tomber pour venir à l'ILL avec un contrat de cinq ans, et aussi à Ferdinand Volino et à Michel Roth qui tous ont fait de l'excellent travail. Il n'y eut aucune difficulté pour recruter des ingénieurs français. Dans le système français, en tous cas au CEA, il n'y a pas de distinction très nette entre chercheurs et ingénieurs : au CEA, tout le monde est appelé ingénieur. Les ingénieurs jouissent d'un prestige au moins aussi grand que les chercheurs. Cela est certainement dû aux grandes écoles d'où sortent les ingénieurs, écoles souvent considérées en France comme un idéal pour l'enseignement supérieur. La situation en Allemagne était alors différente ; il y avait une sorte de hiérarchie entre les chercheurs et les ingénieurs. Au CNRS cette hiérarchie existe aussi. Il est clair que pour Maier-Leibnitz cette hiérarchie n'existait pas. Il est trop intéressé par les développements des instruments pour cela.

Premiers instruments

Une réflexion très poussée avait été faite par les chercheurs de Jülich sur ce que pourraient être certains des dispositifs

expérimentaux associés au réacteur. Les résultats de cette réflexion furent présentés à la conférence de Santa Fe² mentionnée plus haut. Cette réflexion a très largement inspiré le choix des instruments à construire.

Trois instruments pour la physique nucléaire, cinq spectromètres pour la diffusion inélastique et dix pour la diffraction et la diffusion aux petits angles furent les premiers mis en chantier ; ils représentaient environ la moitié des quarante instruments prévus.

Physique nucléaire

Trois instruments furent construits qui étaient des extrapolations d'instruments en fonctionnement à Munich, Jülich et Risø (réacteur danois qui fonctionnait en collaboration avec Jülich). Leur construction fut réalisée avec l'aide des spécialistes travaillant autour de ces réacteurs.

1) Spectromètre de masse pour les produits de fission « Lohengrin »

Cet appareil a pour objet de mesurer le rendement des produits de fission en fonction de la masse, de l'énergie et de la charge. Il fut étudié et construit dans l'industrie sous la responsabilité de E. Moll (arrivé à l'ILL en février 1968. Il venait du groupe de Peter Armbruster à Jülich). De grande dimension, son encombrement avait été à l'origine du désir de Maier-Leibnitz d'avoir un réacteur excentré dans son bâtiment. Avec le diamètre de 60 mètres de ce bâtiment, il n'y eut aucun problème pour son implantation.

2) Spectromètre d'étude des électrons de conversion

Ce spectromètre permet la mesure des électrons de conversion suivant la capture de neutrons thermiques. Il est installé sur le seul canal vertical et donc au niveau de la piscine. Étudié à l'ILL sous la responsabilité de Bernd Maier, il fut construit en partie au CENG, et en partie dans l'industrie.

² ARMBRUSTER P., MAIER G., SCHERM R., SCHMATZ W., SPRINGER T., (1966), « Design studies for the experimental equipment at a very high flux reactor », dans le compte rendu du *Seminar on intense neutron sources*.

3) Spectromètres pour l'étude des gamma émis après capture de neutrons

Ces appareils conçus par von Egidy furent installés aux deux sorties du canal transversal. Le tube porte source a été étudié et construit par la firme Neyrpic de Grenoble. Une partie du spectromètre construit auprès du réacteur de Risø au Danemark, en collaboration avec les physiciens de Munich, est réutilisée. Au début c'est Rüdiger Koch qui eut aussi la responsabilité de cet instrument.

Diffusion inélastique

Cinq instruments furent retenus pour être les premiers construits :

- un spectromètre à trois axes sur la source chaude, IN 1 ;
- un spectromètre à trois axes pour neutrons thermiques, IN 2 ;
- un spectromètre à trois axes de haute résolution IN 3 sur guide thermique ;
- un instrument de temps de vol avec un monochromateur tournant, IN 4 ;
- un instrument de temps de vol avec multiples *choppers* sur source de neutrons froids, IN 5.

Le premier de ces instruments, IN 1, fut construit à Saclay par Bernard Hennion et ses collaborateurs.

IN 2 fut construit à Jülich par Bruno Dorner et Georg Duesing, qui tous deux vinrent à l'ILL, Duesing en 1970 et Dorner en 1972.

IN 4 fut pris en charge à Karlsruhe par Winfried Drexel qui rejoignit l'ILL en 1971.

Les deux autres instruments, plus complexes, furent pris en charge par l'ILL. L'idée d'IN 5 vint de Scherm (encore à Jülich) en 1965. C'est une version très améliorée d'un instrument utilisé à Saclay. La production d'un faisceau monochromatique de neutrons est assurée par un ensemble de quatre disques (en anglais *chopper*) tournant à grande vitesse autour d'un axe horizontal. Ces disques absorbent les neutrons, sauf au niveau de fentes. En synchronisant ces rotors, on ne laisse passer que les neutrons d'une certaine vitesse, dépendant des temps d'arrivée des fentes dans le faisceau. L'utilisation de quatre rotors au

lieu de deux permet d'éliminer les harmoniques. Guy Gobert et François Douchin firent un projet dont la réalisation mécanique fut confiée à la société Bertin et l'électronique à Ispra où existait le savoir-faire nécessaire.

Les trois axes IN 3 diffère des trois axes classiques comme IN 1 et IN 2 par la possibilité de modifier la distance entre le cristal monochromateur et le cristal analyseur. Le but de cette flexibilité est de pouvoir toujours optimiser la focalisation. Techniquement cette flexibilité est obtenue grâce à des tables, portant les cristaux, reposant sur des coussins d'air ce qui les rend amovibles, d'où le nom de « *tanzboden* ». Cette technique fut mise au point par Guy Gobert qui en fit une démonstration en faisant monter Maier-Leibnitz sur une plate-forme à coussins d'air et en le promenant. Elle fut conservée et utilisée pour d'autres spectromètres à trois axes, mais en réduisant les distances entre les tables qui, trop grandes dans le premier appareil, conduisaient à une perte d'intensité trop importante.

Diffusion élastique

Les instruments étudiés et construits dans ce domaine peuvent être classés en trois catégories.

1) Des diffractomètres pour échantillons en poudre

- Un complexe de deux diffractomètres D1A et D1B, installé sur un guide de neutrons thermiques et utilisant les faisceaux de neutrons diffractés par des plans différents du même monochromateur. L'un des appareils, D1A, est conçu pour du travail à haute résolution, l'autre utilise un multidétecteur. Ces appareils furent installés par Paul Burlet venu du CENG et recruté par l'ILL en octobre 1997.
- Un appareil pour les structures magnétiques D2, construit par le laboratoire du CENG pour être mis en place sur le canal H11 lui aussi par Paul Burlet.

2) Des diffractomètres pour échantillons monocristallins

- Un diffractomètre classique D8 installé lui aussi sur le canal H11 par Alain Filhol, venu du laboratoire de cristallographie de Gay à Bordeaux.

- Un diffractomètre D6, baptisé hérisson, qui permet la mesure simultanée des réflexions produites par l'échantillon. Pour cela cent détecteurs sont montés sur une sphère. Ce diffractomètre, conçu à l'ILL, pour étudier la structure de protéines, y fut construit par Bertram Klar, pour sa thèse.
- Un diffractomètre D5 pour neutrons polarisés, destiné à être installé sur le canal H 4 de la source chaude. Les neutrons polarisés sont produits par un monochromateur FeCo. Une table d'analyse permet de mesurer la polarisation des neutrons diffractés. L'appareil conçu au laboratoire de Bertaut fut construit par Jacques Schweizer, venu de ce laboratoire.
- Un diffractomètre D10 très versatile qui, outre un fonctionnement comme un diffractomètre à 4 cercles classique, permet aussi une analyse en énergie. Installé sur un guide de neutrons thermiques, cet appareil fut conçu à l'ILL et construit par Armin Tippe.

En dehors de la construction des instruments, il semblait nécessaire de former des chercheurs à la cristallographie des protéines qui paraissait alors comme un domaine de recherche très important pour un réacteur à haut flux et pour laquelle le diffractomètre D6 avait été construit. La première idée pour assurer cette formation fut d'inviter David Blow, un éminent cristallographe anglais, élève de Max Perutz, à venir à Grenoble avec un poste permanent. Ceci fut fait fin 1970 ou en janvier 1971. Finalement David Blow, par une lettre du 15 janvier 1971, déclina l'offre tout en manifestant son intérêt pour la diffraction des neutrons et en proposant une collaboration. Hartmunt Fuess, un des premiers chercheurs de l'Institut, fut envoyé pour une année chez Dorothy Hodgkin qui avait résolu la structure de la vitamine B12 et avait complété son travail sur les rayons X par une étude sur les neutrons. Puis, en septembre 1972, Ulrich Arndt, venu lui aussi du laboratoire de Max Perutz, fut recruté et resta jusqu'en août 1973. Finalement, le diffractomètre D6 se révéla inapproprié et le domaine de la cristallographie des protéines fut laissé de côté avant d'être repris plus tard avec un diffractomètre classique.

3) Des appareils pour diffusion diffuse

Deux instruments furent prévus pour ce type d'études.

- *Le premier, D11*, était destiné aux expériences de diffusion aux petits angles pour étudier les gros objets (e.g. virus) ou les grosses inhomogénéités. L'appareil a été conçu à Jülich et mis en place, sur l'un des guides de neutrons de la source froide, par Konrad Ibel, qui arriva de Jülich au début 1970. Un faisceau monochromatique est extrait à l'aide d'un sélecteur de vitesse. Les distances entre monochromateur et échantillon et entre échantillon et détecteur peuvent atteindre 40 mètres. Ces distances peuvent être réduites par l'insertion de guides de neutrons amovibles (avant l'échantillon) ou en déplaçant le détecteur (après l'échantillon). Ces grandes distances avaient été proposées d'abord par Tasso Springer puis eurent le soutien de Maier-Leibnitz, à juste titre car elles permettent, à même résolution, un gain en intensité. J'étais alors, à tort, d'un avis contraire. Le détecteur est un multidétecteur à deux dimensions de 64 cm de côté qui fut réalisé en collaboration avec le groupe détecteur du CENG. Cet appareil est aussi utilisé pour des expériences de diffraction par systèmes possédant une périodicité avec une grande maille. Il est essentiel par exemple pour l'étude des lignes de vortex dans les matériaux supraconducteurs, dits de type II, immergés dans un champ magnétique.
- *Le second D7*, situé aussi sur l'un des guides de la source froide, est conçu pour étudier la diffusion provenant de défauts ponctuels. Sa conception fut élaborée à Jülich (Günther Bauer et Otto Shärpf). Un monocristal prélève un faisceau monochromatique. Les neutrons diffusés sont reçus par des groupes de détecteurs. Un disque tournant (*chopper*) situé juste avant l'échantillon permet une analyse en énergie des neutrons diffusés. L'appareil peut aussi utiliser des neutrons polarisés.

Tels furent les premiers instruments prévus et mis en construction, soit à l'ILL, soit dans des laboratoires travaillant déjà auprès des réacteurs européens existants (Saclay, Munich, Jülich, Karlsruhe, Grenoble et Risö).

Optique des neutrons

Sur tous les appareils, qu'ils soient utilisés pour de la diffusion inélastique ou pour de la diffraction, faisant usage de monochromateurs monocristallins, un grand effort d'optimisation fut fait. L'idée essentielle, une fois de plus due à

Maier-Leibnitz, était d'utiliser systématiquement des monochromateurs focalisant. Cela supposait la mise en place de toute une infrastructure : four pour faire croître les cristaux et étudier leur mosaïcité. Pour cela, des diffractomètres utilisant le rayonnement γ furent utilisés avant que le réacteur soit en fonctionnement. De nombreux physiciens de l'ILL furent impliqués dans cette recherche. Mais en priorité il faut mentionner Andreas Freund qui vint à la fin de l'année 1967 pour préparer une thèse avec Maier-Leibnitz sur ce thème. C'est lui qui construisit le premier diffractomètre γ . Puis, progressivement, il devint le coordinateur des études sur les monochromateurs. Ces études furent menées dans différentes directions : monochromateurs composites, courbure à chaud des cristaux, four associé à un diffractomètre γ permettant de contrôler la mosaïcité durant la croissance cristalline, etc.

Il faut remarquer que, pour la fabrication des monocristaux, l'ILL n'a dû compter que sur lui-même, l'industrie étant en général réticente à s'engager dans un domaine où les débouchés sont limités.

Construction du réacteur

À ce stade de la construction du réacteur, le travail consistait d'abord à affiner et à terminer l'étude. Ensuite il fallait passer les commandes. Pour faire ce travail, l'équipe, qui comprenait vingt-cinq personnes (environ quinze ingénieurs français et dix allemands) est restée dans la région parisienne. Implantée d'abord à Saclay, elle déménagea avenue d'Iéna, à Paris, dans des locaux inoccupés appartenant au CEA. Cela lui permit de prendre un peu de recul par rapport au département des réacteurs que les Allemands trouvaient un peu trop envahissant. À ce stade, la présence à Grenoble n'était pas indispensable, d'autant plus que, d'un commun accord, il avait été fait appel à un architecte industriel qui agit comme coordinateur pour la réalisation du projet et pour la construction. Cet architecte industriel était en fait un consortium regroupant du côté allemand Interatome (associé à AEG et Siemens) et du côté français GAAA³ et GERI⁴. Dans le cas de l'ILL, l'architecte avait aussi pour tâche de veiller à une répartition paritaire des commandes entre les deux pays. Ce n'est qu'à la fin de 1968, au moment où débutaient les travaux pour le gros

³ Groupement Atomique Alsacien Atlantique, devenu depuis Novatome.

⁴ Groupe spécialisé dans le génie civil.



Figure 5.1. Visite du chantier en avril 1971. On voit au premier plan Néel, avec à sa droite Chatoux et à l'extrême droite Droulers.

œuvre, qu'une petite partie de l'équipe s'installa à Grenoble, les autres membres faisant la navette entre Paris et Grenoble.

Les travaux sur place commencèrent bien. Malheureusement, l'année 1970, cruciale dans le développement de l'Institut, fut marquée par un terrible accident sur le chantier du réacteur.

L'accident

Le 13 février 1970, à 15 h 30, le toit, alors en construction, du bâtiment destiné à abriter le réacteur s'effondra, entraînant dans sa chute sept ouvriers qui travaillaient à son assemblage. Le bilan est de cinq morts et deux blessés graves. Pour comprendre cet accident, il faut savoir que ce toit était constitué de dalles de béton fabriquées en usine, pesant chacune sept tonnes. Ces dalles étaient assemblées sur place. Pour cela, un échafaudage tubulaire fut construit partant du niveau qui est maintenant le niveau expérimental. Les dalles étaient posées sur cet échafaudage et ensuite assemblées par une coulée de béton. Ce château de cartes s'est effondré alors qu'environ un quart des dalles était posé. Les ouvriers tués travaillaient sur les dalles et sont tombés avec elles. Les cinq morts sont Albert Botta (29 ans), Abder Khader Benfatem (22 ans), Rabah Ben Mohamed Dahmani (28 ans), Abdel Khader Bachir-Elezaar (30 ans) et Belkhacem Khadraoui (22 ans). Ces hommes, qui sont morts en travaillant pour que les physiciens disposent de la meilleure source de neutrons, méritent bien le droit d'être

nommément cités dans ce livre. Une heure ou deux après l'accident arrivaient cinq cercueils. Il y en avait quatre du modèle le plus simple et le moins coûteux et un plus beau avec des poignées de cuivre. Je laisse le lecteur deviner à qui ce dernier était destiné. Tous ceux qui ont vu cela en furent profondément choqués.

L'accident fut évoqué à la réunion, le 14 avril 1970, du comité de direction de l'ILL. Après une minute de silence, la réunion se déroula normalement et Chatoux fit un rapport sur l'accident : un retard de deux mois pourrait en résulter. Une collecte en faveur des victimes fut faite auprès du personnel et Hasenclever demanda l'autorisation d'y participer pour 7 000 francs (environ 7 000 euros). Cette proposition fut acceptée « à condition que la collecte ait un caractère anonyme afin d'éviter dans tous les cas que ce geste de l'Institut puisse être considéré comme une reconnaissance, même indirecte de la responsabilité de l'Institut à l'accident ».

Deux entreprises étaient impliquées dans cette construction : l'entreprise Campenon-Bernard qui assemblait le toit, et l'entreprise Mills qui avait assemblé l'échafaudage. On peut noter qu'on utilisait une technique non encore appliquée à un ouvrage de cette dimension. L'échafaudage était très léger et non attaché aux murs du bâtiment, donc très instable. Je me souviens parfaitement que j'évitais de pénétrer dans le bâtiment sous ce toit en construction. Les deux firmes se repassèrent la responsabilité de l'accident. Finalement deux responsables de Mills furent jugés et condamnés. En 1992, une tribune du stade Furiani à Bastia s'effondra entraînant dans sa chute les spectateurs et causant de nombreux morts. Là aussi la tribune reposait sur un assemblage tubulaire. Il est remarquable que l'ILL ne possède aucune archive sur cet accident. Je n'ai, en particulier, pu trouver aucune photo. J'ai dû me contenter de reproduire (fig. 5.2) une photo parue dans la presse locale (*Dauphiné Libéré*) que j'avais dans mes archives personnelles.

Cet accident conduisit Chatoux à réorganiser l'équipe projet. Après avoir noté une carence manifeste de l'architecte industriel qui n'assurait pas de façon satisfaisante le contrôle des travaux, il confia des missions particulières à Messieurs Reutler et Martin. Reutler fut en charge de tout ce qui touchait à la sécurité, avec délégation pleine et entière du chef de projet. Jean-Paul Martin fut chargé d'une tâche de coordination et de liaison avec l'architecte industriel, lui aussi avec une délégation du chef de projet. Ces deux ingénieurs furent dès lors à temps plein sur le site de construction. Après quoi il n'y eut

SAMEDI 14 FÉVRIER 1970

25 ● FAITS DIVERS ●

Danphye Lohane

pole (en construction) du réacteur de l'Institut franco-allemand de Grenoble s'effondre

Cinq ouvriers tués, deux blessés

Le corps d'une des victimes est en état grave ; l'autre semble moins atteint. Le corps d'une des victimes ne peut être délogé immédiatement.

Une opération fut alors montée. Des ouvriers attaquent au chalumeau l'enchevêtrement de ferraille pour permettre à cet effet, au Latus, de monter le grand de mètres de diamètre de la pose supposée qui page. Une

Out-flux vice

du réacteur signé le les trois et allemande Latus -

ands et surer le é émonné à service 1971.

bons de ils dans i dont le la psal-lus pre-dans ce peut-être à moyen

le réac-tera par-ent pour ique nu-ndant-ndre les des so-

ues de bé-les char-nes. Elles re-ur le fait é d'autre tenues par treize pla-que. Aussié informé, le préfet de l'Isère, M. Jean Vaudruille s'est rendu sur les lieux. Il était accompagné de M. Hubert Dubouché, maire de Grenoble, des adjoints MM. Silber et Royer ; M. Planier, inspecteur départemental du service incendie.

MM. Vissot, Juge d'instruction et Chanas, substitués auprès du Procureur de la République étaient également présents.

ment déclarer : « Une commission d'enquête se réunira dès ce soir, mais on peut dire dès à présent, que les causes exactes seront encore difficiles à déterminer. »

Le procédé employé pour la construction du toit de cet édifice n'a rien de révolutionnaire, il est couramment utilisé.

« Pour l'instant, nous ne nous expliquons pas les raisons de ce drame. »

Les victimes

Abdel Khader Benfatem, 22 ans, célibataire, demeurant 64, cours Berriat à Grenoble, décédé.

Albert Boita, 20 ans, marié, domicilié rue du Vercors à La Tronche.

Babah Ben Mohamed Dahmani, 20 ans, célibataire, logement au chaletier.

Abdel Khader Buchir-Messar, 20 ans, marié, en Algérie, demeurant 18, rue Gustaf à Grenoble.

Belkhaoum Khadrouti, 22 ans, 3, rue Marabout à Grenoble.

Alfred Haari, grièvement blessé.

Emunilo Mecotto, demeurant « Les Olympiades » à Pont-de-Clair, est légèrement blessé.

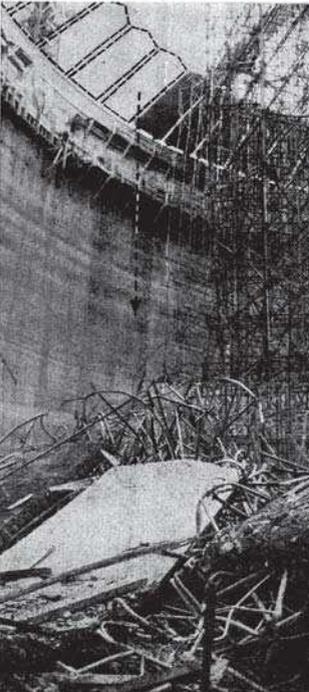
L'ouvrier dont on pourrait apercevoir le cadavre, il s'agissait également de savoir si, par malheur, une ou plusieurs autres personnes se trouvaient en cet endroit au moment de l'accident. C'est pour ces raisons qu'il était urgent d'entreprendre cette opération de démantèlement.

Une expertise a été ordonnée pour déterminer les causes de ce dramatique accident qui ne peut cependant affecter la poursuite du programme de construction. Les travaux du Génie civil étaient presque achevés puisque le sommet de l'un des bâtiments de l'Institut franco-allemand arbore le traditionnel bouquet orné d'un drapeau.

Sur les lieux de l'accident

Aussié informé, le préfet de l'Isère, M. Jean Vaudruille s'est rendu sur les lieux. Il était accompagné de M. Hubert Dubouché, maire de Grenoble, des adjoints MM. Silber et Royer ; M. Planier, inspecteur départemental du service incendie.

MM. Vissot, Juge d'instruction et Chanas, substitués auprès du Procureur de la République étaient également présents.



En haut du cliché, sur le pourtour du mur circulaire de béton, on distingue une partie des plaques de béton devant constituer le dôme abri du réacteur. A gauche, l'échafaudage tubulaire dont une partie fut arrachée et broyée par la chute des 210 t. de béton. Ce sont ces plaques qu'il fallut enlever pour déloger le corps de l'une des victimes de la tragédie.

Figure 5.2. Photographie du futur hall du réacteur, après l'effondrement d'une partie du toit en construction, publiée le 14 février dans le journal régional « Le Dauphiné Libéré ». © Le Dauphiné Libéré.

plus de problèmes. On ne dira jamais assez à quel point les rôles de Reutler et de Martin furent essentiels dans la réussite de la construction du réacteur.

Caractéristiques du réacteur

La construction fut achevée au cours l'été 1971 et le réacteur fut critique pour la première fois le 31 août de cette année, soit seulement trois ans après le début du travail sur le site. Il atteignit sa pleine puissance le 21 décembre c'est-à-dire moins de cinq ans après la création de l'ILL.

Le tableau ci-après (reproduit à partir de celui assemblé par Franco Franzetti pour une plaquette rédigée pour le vingtième

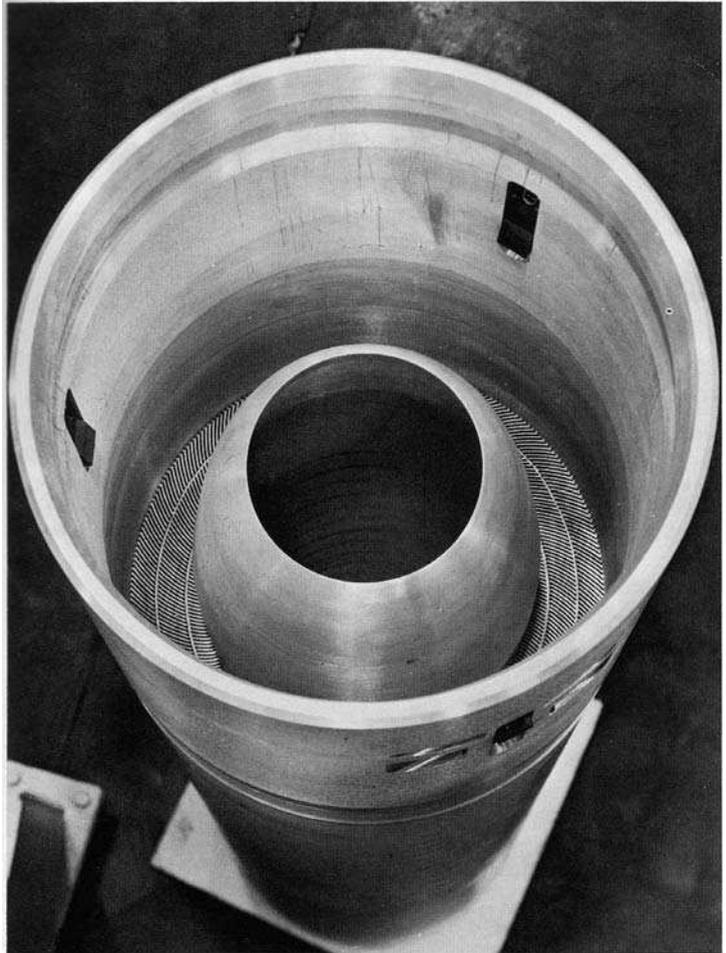


Figure 5.3. Photographie de l'élément combustible. On voit la cavité centrale dans laquelle sont les barres de contrôle et les plaques entre lesquelles circule l'eau lourde.

anniversaire de l'ILL) donne toutes les caractéristiques du réacteur et montre que la puissance considérable qu'il faut extraire du cœur impose une conception très particulière de ce cœur. Ce dernier, inspiré de celui du réacteur HFIR (*High Flux Isotope Reactor*) d'Oak Ridge, fut conçu et calculé par Louis Brégeon. Il est de forme cylindrique et constitué d'un assemblage de longues (80 cm) et fines (1,27 mm) plaques courbées entre lesquelles circule le fluide refroidisseur (fig. 5.3). L'élément combustible doit nécessairement être considérablement enrichi en U^{235} . Le trou central, qui dans le réacteur d'Oak Ridge sert à irradier des matériaux, est utilisé pour y loger, dans les meilleures conditions neutroniques, la barre de contrôle.

Tableau 5.1. Suite.

Refroidissement		
	Puissance	57 MW
	Densité de puissance maximum	3,3 MW/dm ³
	Densité de puissance moyenne	1,14 MW/dm ³
	Débit calorifique maximum	500 W/cm ²
	" moyen	174 W/cm ²
Débit du refroidisseur :		
	Dans l'élément combustible pendant le fonctionnement	2 158 m ³ /h
	" l'arrêt	150 m ³ /h
	Dans les barres de contrôle pendant le fonctionnement	75 m ³ /h
	" l'arrêt	60 m ³ /h
Vitesse du refroidisseur entre les plaques		15,5 m/s
Pression du refroidisseur à l'entrée du combustible		14 bars
" à la sortie du combustible		3,2 bars
Pression dans le bidon réflecteur		4 bars
Température maximum à la surface des plaques		147 °C
Durée du cycle du réacteur		44 jours

Ceci pose le problème de l'approvisionnement en uranium enrichi. L'Allemagne, bien entendu, n'avait pas d'usine d'enrichissement. La France en possédait une, construite à des fins militaires, à Pierrelatte. Mais le prix de revient de cet uranium était prohibitif. Il fallut se tourner vers les États-Unis. Il n'y avait pas à cette époque de réglementation très rigoureuse sur l'exportation par les États-Unis d'uranium très enrichi (utilisable pour faire une bombe). Un accord fut donc passé avec les États-Unis pour l'achat de l'élément combustible et le réacteur de l'ILL put être mis en route sans problèmes. Nous verrons plus loin que l'apparition ultérieure d'une réglementation plus rigoureuse a posé de sérieux problèmes à l'ILL.

L'eau lourde est aussi une composante essentielle du réacteur qui a besoin de 42 mètres cube. La plus grande partie (40 mètres cube) fut fournie par l'usine de Mazingarbe (France). Les 2 mètres cube manquants furent de provenance américaine.

On peut remarquer que les caractéristiques de ce réacteur sont beaucoup plus sévères que celles des réacteurs produisant de l'électricité. La densité de puissance dans le cœur y est au moins d'un ordre de grandeur plus grand que dans les

réacteurs à eau pressurisée et de trois ordres de grandeur plus grands que dans les réacteurs graphite gaz.

Le deutérium de l'eau lourde a une section efficace de capture des neutrons environ 1 000 fois plus faible que celle de l'hydrogène, mais il faut en tenir compte. Cette capture conduit à la formation de tritium, isotope radioactif de l'hydrogène avec un temps de vie de douze ans. En l'absence d'une installation de détritiation, l'eau lourde du réacteur aurait ainsi à l'équilibre une radioactivité de 80 curies par litre. Dans ces conditions, une fuite même modeste, pourrait avoir de sérieuses conséquences pour l'environnement. Elle rendrait aussi plus délicates les interventions d'entretien sur les circuits d'eau lourde. Le réacteur comporte donc une installation de détritiation. Cette installation prototype est restée longtemps unique au monde. Elle comprend une étape d'échange catalytique entre la vapeur d'eau lourde à traiter et du deutérium, suivie d'une distillation du deutérium liquide qui sépare l'hydrogène et le tritium du deutérium. Cela permet aussi d'éliminer toute contamination de l'eau lourde par de l'eau légère. Tout cela est implanté dans un bâtiment spécialement conçu dans lequel toutes les précautions sont prises pour éviter une explosion de l'hydrogène gazeux. J'ai mentionné plus haut les difficultés de trouver preneur pour ce tritium. Une telle installation était alors unique au monde. En particulier le réacteur de Brookhaven n'en possédait point. Il serait injuste d'attribuer son arrêt définitif en 1999 à cette absence. Mais on peut remarquer que cet arrêt fut consécutif à une très légère pollution en tritium du sous-sol. Ce tritium provenait du bassin de stockage des éléments combustibles usés, bassin qui recevait un peu d'eau lourde (tritiée) à chaque transfert du cœur au bassin.

Liaison entre la direction de l'Institut et le groupe projet

Il y avait de fréquentes discussions entre Maier-Leibnitz et moi-même avec Dautray, puis avec Chatoux et Eiserman. Mais cela ne suffisait pas pour assurer une coopération totalement efficace. Deux personnes jouèrent un rôle essentiel dans cette coordination. La première fut Yves Droulers, déjà mentionné, qui aurait, une fois le réacteur terminé, à en assurer le fonctionnement quotidien. Il était donc indispensable pour lui de bien le connaître dans tous ses détails. Il constitua rapidement le service réacteur (toujours cette même politique de faire les

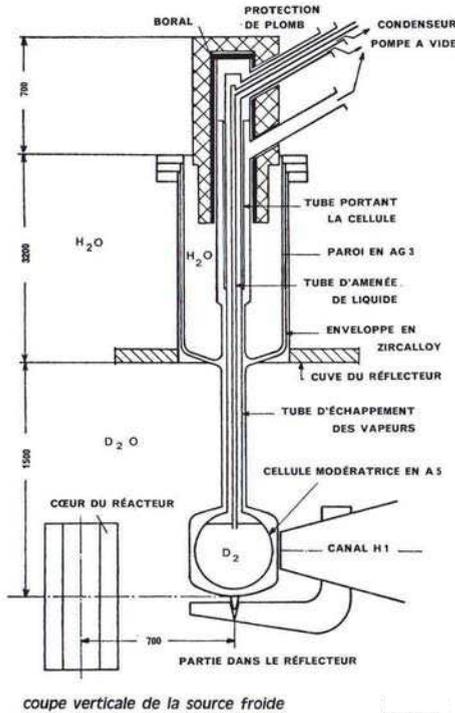
Figure 5.4. À gauche Paul Ageron (1931-1998), à sa droite Walter Mampe (décédé en 1992) et Norman Ramsey. Ce dernier, prix Nobel de physique en 1989, venait régulièrement, après sa retraite, réaliser avec Mampe des expériences à l'ILL.



recrutements suffisamment tôt) qui à la fin 1970 comprenait déjà trente-sept agents. Ce personnel était étroitement intégré avec les équipes du groupe projet et de l'architecte industriel, ce qui était certainement la meilleure façon de connaître le réacteur. La deuxième personne fut Paul Ageron (1931-1998) (fig. 5.4). Nous l'avons déjà rencontré à l'époque de la préhistoire, puisqu'il fut le premier auteur de la communication à Genève en 1964 qui conduisit à la création de l'ILL. Il fut rapidement un élément clé du groupe projet, puis il fut recruté par l'ILL le 1^{er} janvier 1970. À ces deux postes, il s'est occupé prioritairement de la source froide et des conduits de neutrons (qui ont une partie en pile et une partie hors pile), c'est-à-dire des deux principaux dispositifs qui donnent au réacteur son originalité et sa supériorité par rapport aux autres. Pour leur réalisation, une étroite collaboration était indispensable entre les futurs utilisateurs et le groupe projet. D'une extrême compétence, Paul Ageron était aimé et estimé par tous.

Pour la réalisation de la source froide⁵, Ageron s'est appuyé sur le service des basses températures du CENG. Un ingénieur, Jean-Marie Astruc y fut recruté en 1970 pour diriger ce projet au sein du service réacteur. Le deutérium liquide fut choisi car il permettait d'utiliser un volume suffisamment grand (25 litres) pour pouvoir fournir des faisceaux à cinq conduits de neutrons de $202 \times 33 \text{ mm}^2$. Par ailleurs, le deutérium perturbe moins les flux de neutrons que ne le ferait

⁵ Décrite dans la publication « La source de neutrons froids pour le réacteur à haut flux franco-allemand de Grenoble » par P. Ageron, R. Ewald, HD. Harig et J. Verdier, in *Énergie Nucléaire*, 13, 1-7 (1971).



SOURCE FROIDE

Cellule :

Sphère d'aluminium A 5 de diamètre \varnothing 380 mm, d'épaisseur 1,5 mm, prise dans une enceinte à vide en zircaloy.

Volume :

- De D² liquide : \sim 25 litres
- De D² gaz TPN : 50 m³.

Pression :

- D² température ambiante : 3 bars,
- D² à froid : 1,5 bars.

Puissance spécifique :

- 0,8 W/g dans D²,
- 1,5 W/g dans Alu.

Puissance nucléaire totale :

- 5,8 KW (dont 3,1 dans D²).

Pertes thermiques :

- 1,2 KW

Puissance du réfrigérateur :

10 KW à 25° K, ce qui nécessite 2 compresseurs Hélium de 400 KW chacun.

Flux moyen de neutrons thermiques à l'emplacement de la source :

- $5 \cdot 10^{14}$ n/cm².s.

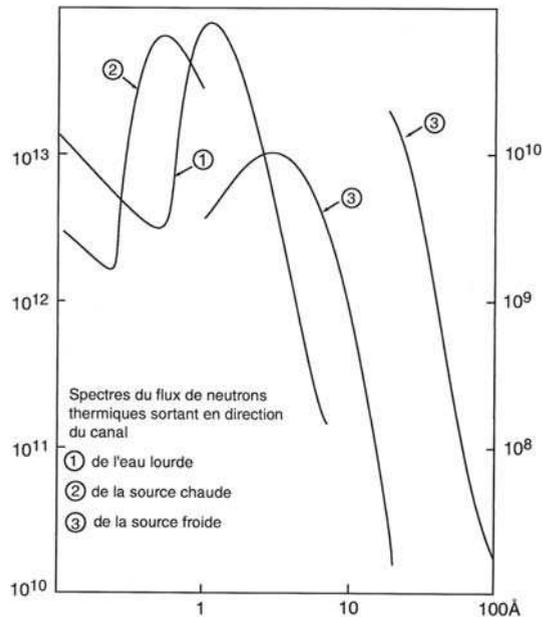
Principe de fonctionnement :

Le deutérium liquide se vaporise dans la CELLULE; les vapeurs montent dans un CONDENSEUR refroidi à l'hélium. La cellule et le condenseur sont en libre

l'hydrogène liquide. La puissance qu'il faut évacuer du deutérium liquide est d'environ 6 KW, ce qui nécessite une puissance frigorifique voisine de celle nécessaire au fonctionnement des plus grosses chambres à bulle à hydrogène liquide, détecteurs alors utilisés auprès des gros accélérateurs. Il a fallu pour le liquéfacteur choisir entre les offres d'une firme allemande (Linde) et d'une firme française (L'Air Liquide). Cette dernière était innovatrice car elle utilisait une turbine à paliers à gaz. Elle fut finalement choisie. Ce dispositif s'est avéré très fiable et fonctionne encore après trente années de service. La cellule est introduite verticalement dans le bidon réflecteur à partir du niveau supérieur. Elle est située à 50 centimètres de la surface du cœur. Les problèmes de sécurité ont été très étudiés. En particulier, tout est fait pour qu'aucun oxygène ne soit en contact avec l'hydrogène rendant impossible la formation d'un mélange stœchiométrique, potentiellement explosif. Cependant, si un tel mélange venait à se former, les parois résisteraient à la pression de 19 bars, qui est la pression d'une onde de détonation (fig. 5.5). La présentation du réacteur de l'ILL à la conférence de Santa Fe incluait celle de la source

Figure 5.5. Schéma de la source froide dans sa première version. Quant il fallut la remplacer, elle fut améliorée (voir fig. 7.4) pour gagner en intensité et ajouter un canal vertical.

Figure 5.6. Flux de neutrons sortant d'un canal tangentiel normal (courbe 1) de la source froide (courbe 3) et de la source chaude (courbe 2) en fonction de la longueur d'onde. On voit les gains considérables en flux des neutrons de courte longueur d'onde (source chaude) et de ceux de grande ou très grande longueur d'onde (source froide).



froide déjà prévue avec du deutérium liquide. C'est cette composante du projet qui fut alors l'objet du plus grand nombre de questions, lesquelles reflétaient un certain scepticisme chez plusieurs participants. C'était un choix radicalement différent par rapport à celui du projet britannique dans lequel on cherchait à minimiser le volume d'hydrogène liquide à l'intérieur du réacteur. La suite a démontré que ce scepticisme était infondé.

Le réacteur comprend aussi une source chaude qui permet d'accroître le flux des neutrons d'énergie comprise entre 0,15 et 1 eV. Paul Ageron ne fut pas directement impliqué dans sa construction. Son étude fut effectuée par le GFK de Karlsruhe en collaboration avec le groupe projet et sa réalisation confiée à la société Heraeus. Elle consiste en un cylindre de graphite de 20 centimètres de diamètre et 30 centimètres de haut qui est porté à une température de 2 000 °C par le rayonnement ; les neutrons sont récupérés par l'intermédiaire de trois canaux horizontaux et un canal incliné. La figure 5.6 démontre l'intérêt de ces sources chaude et froide. La figure 5.7 montre l'emplacement de ces dispositifs dans le bidon réflecteur.

Les guides de neutrons occupent une place essentielle à l'ILL, puisqu'ils desservent, au moment de la mise en route du réacteur, 40 % des emplacements possibles pour des dispositifs expérimentaux. Depuis la mise en route de la seconde source froide, ce pourcentage a encore augmenté. Découverts par

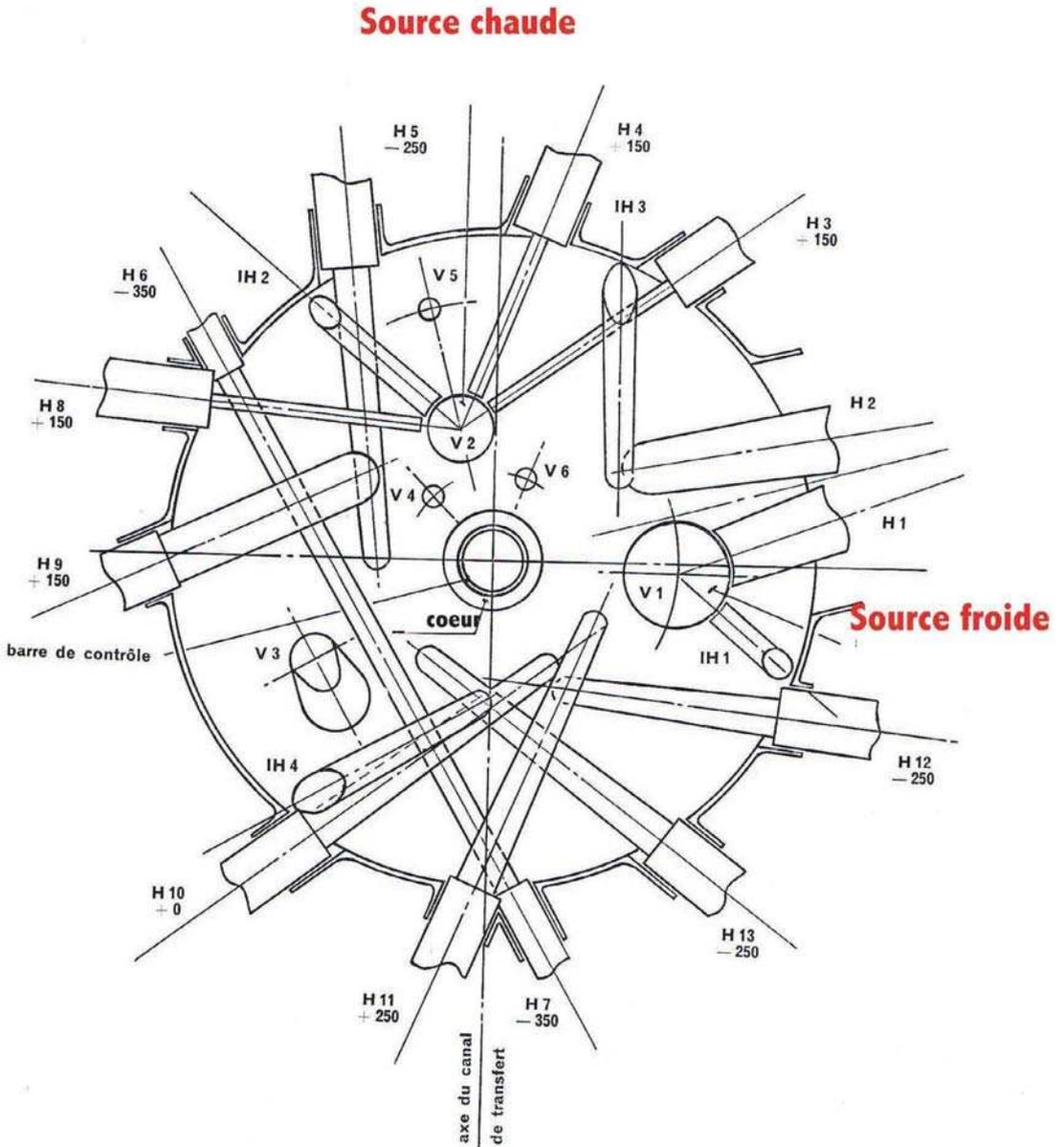


Figure 5.7. Disposition de l'ensemble des canaux expérimentaux et des sources froides et chaudes dans le bidon réflecteur tel qu'il était au moment de la divergence du réacteur en 1971 et de la mise en route des sources en 1972. Ces dernières sont respectivement à l'intérieur des canaux verticaux V1 et V2.

hasard⁶ en 1961 par Tasso Springer à Munich, le principe des guides, élaboré par Maier-Leibnitz est simple : quand il y a une interface entre le vide et un milieu d'indice de réfraction n pour les neutrons, et que cet indice est inférieur à 1, il y a réflexion totale des neutrons lorsque l'angle d'incidence est inférieur à l'angle critique γ , défini par la relation $\cos \gamma = n$. Cet indice est relié à l'amplitude de diffusion cohérente a du milieu et à la longueur d'onde λ des neutrons par la formule :

$$n^2 = 1 - (Na\lambda^2/\Pi)$$

dans laquelle N est le nombre de noyaux d'amplitude de diffusion a par centimètre cube.

Le matériau utilisé le plus souvent à cette époque était une plaque de verre (que l'on sait fabriquer industriellement avec une surface parfaitement plane), recouverte d'une couche de nickel pour augmenter l'amplitude de diffusion et donc l'angle critique. Ce phénomène de réflexion totale permet au faisceau de neutrons de se propager à plusieurs dizaines de mètres, dans des régions où le bruit de fond est beaucoup plus faible qu'au voisinage immédiat du réacteur. Les guides peuvent être légèrement courbés, ce qui permet d'éliminer les neutrons rapides qui parviendraient directement sur l'échantillon et de séparer les instruments, ce qui permet d'en mettre un plus grand nombre. Bien entendu, les guides doivent être à l'intérieur d'une enceinte qui permette de maintenir le vide sur le trajet des neutrons. Cette méthode pour se débarrasser des neutrons rapides permet d'éliminer les filtres à neutrons utilisés jusqu'alors à cette fin. Ces filtres utilisent un matériau qui n'absorbe pas les neutrons et dont la section efficace de diffusion incohérente est très faible. Les neutrons ayant une longueur d'onde plus grande que les distances inter-réticulaires de ce matériau le traversent donc, alors que ceux de plus courte longueur d'onde sont diffractés et donc disparaissent du faisceau. Le béryllium est une substance de choix pour cela. Le projet britannique de 1962, mentionné plus haut, prévoyait la mise en place de tels filtres dans les canaux à l'intérieur du réacteur. Dans les canaux de l'ILL, il n'y a aucune substance solide, qui conduirait nécessairement à une réduction du flux, sur le parcours des neutrons à l'intérieur du réacteur.

⁶ Lors d'une expérience auprès du réacteur de Munich, un faisceau de neutrons avait été laissé sans protection sur plusieurs mètres. Pour empêcher les gens de le traverser, un tube de laiton fut mis autour du faisceau. À la grande surprise des chercheurs, il en résulta un accroissement de l'intensité à la sortie du tube. Tel est le récit fait par Tasso Springer dans son article sur Maier-Leibnitz et l'optique des neutrons (2001).

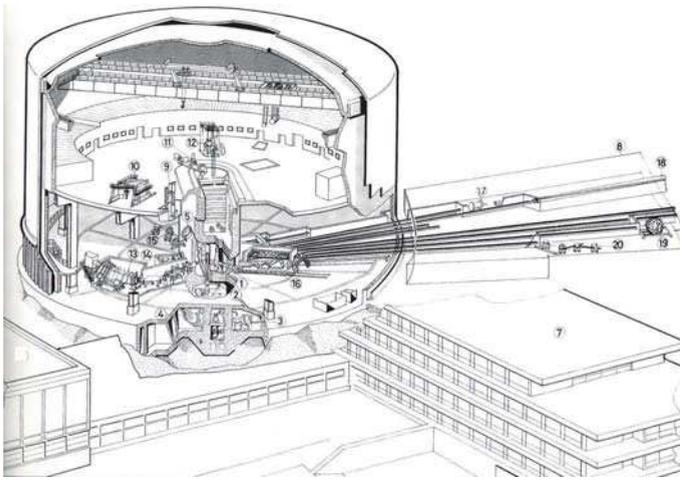


Figure 5.8. Croquis représentant le réacteur dans son bâtiment avec les guides de neutrons débouchant dans un bâtiment séparé. Quelques instruments sont très grossièrement dessinés. Là encore il s'agit du réacteur à sa mise en route. Depuis, une nouvelle source froide a été installée qui alimente des guides de neutrons débouchant dans un nouveau hall situé derrière le bâtiment réacteur, tel qu'on le voit sur ce dessin.

À l'ILL, dix conduits ont été mis en place à l'origine, cinq visent la source froide et cinq servent pour les neutrons thermiques. Ils sortent tous d'un seul canal. Huit (4 + 4) de ces conduits aboutissent hors du bâtiment du réacteur dans un autre bâtiment adjacent de 90 mètres de long et 35 mètres de largeur, nommé hall des guides (figs. 5.8 et 5.9). Ils sont légèrement courbés, pour réduire le bruit de fond, avec des rayons de courbure variant, suivant les guides entre 25 mètres et 27 kilomètres. En tout, l'installation contient 473 mètres de guides à poste fixe auxquels il faut ajouter 120 mètres de conduits qui répartissent à la sortie des conduits principaux les faisceaux de neutrons entre les différentes expériences. En effet, les conduits avaient 20 centimètres de haut permettant de disposer trois expériences sur chaque guide. C'est Paul Ageron et Paul Blum qui se sont occupés de la construction et de la mise en place de ces conduits, faisant appel pour la partie optique à la firme Jobin-Yvon-Jouan-Quentin et pour la mécanique à Neyrpic et à MAN. On peut apprécier le rôle considérable de Paul Ageron pour faire de l'Institut une réalité. Maintenant on commence à remplacer certains conduits verre nickel par des supermiroirs (décrits par ailleurs).

L'informatique à l'ILL⁷

ILL a été bâti au moment où l'informatique commençait lentement à tenir la place qui est maintenant la sienne. Dans les

⁷ Je remercie beaucoup Ron Ghosh et Alain Filhol pour leur aide dans la rédaction de cette partie.

Figure 5.9. Photographie d'une partie du hall de guides. On y voit une petite partie des instruments installés sur le guide de la source froide. Au deuxième plan, la protection autour des détecteurs de la machine à temps de vol décrite plus haut (fig. 3.4). Les instruments sont peints en couleurs vives. Cela fut introduit dès 1972 pour créer un environnement plus agréable pour les utilisateurs.



travaux que j'avais réalisés à Saclay, j'utilisais pour mesurer les temps de vol des neutrons des sélecteurs n'ayant que dix canaux qu'il fallait lire manuellement. Je me souviens de mon émerveillement, visitant le réacteur de Brookhaven, en voyant chaque expérience couplée à un minicalcateur (des PDP8, je pense) qui la pilotait et collectait les données. L'avance des collègues de Brookhaven était due l'existence aux États-Unis d'une industrie capable de mettre en œuvre une telle réalisation. Michael Taeschner fut recruté en avril 1969 pour s'occuper de l'informatisation des expériences. À cette époque, la politique, tant en Allemagne qu'en France, était de soutenir les industries nationales en faisant appel à elles. Il nous a fallu en tenir compte.

L'informatisation fut bâtie autour de deux systèmes : le premier appelé CARINE faisait appel à deux calculateurs T 2000 fabriqués par la société française Télémécanique. Ce système gérait douze expériences exigeantes en matière de contrôle, mais pas en matière de collection de données (diffractomètres, trois axes). La réalisation en fut confiée au laboratoire d'électronique et de technologie de l'informatique (LETI) du CENG. Une fois livré, il fut pris en charge par Lesourne (recruté le 1^{er} janvier 1971). Le second système, nommé NICOLE, était bâti autour de deux calculateurs TR 86 d'AEG-Telefunken. Il gérait six expériences qui avaient à traiter un grand nombre de données (par exemple la diffusion aux petits angles). La réalisation en fut confiée au service compétent de la GfK de Karlsruhe. À l'ILL, Kaiser (recruté le 1^{er} juillet 1970) s'en

occupa. Deux des expériences de physique nucléaire bénéficièrent chacune d'un mini-calculateur PDP-11.

Soutenir les industries nationales s'est vite avéré être très handicapant. En effet, le choix du travail partagé sur des systèmes lents comme Carine et Nicole aboutissait à des aberrations. Par exemple, sur Nicole, chaque envoi d'une commande était suivi d'une attente dépassant souvent cinq secondes. Ceci n'était, sans doute, pas trop handicapant pour des instruments lents (spectromètres à trois axes) mais catastrophique pour d'autres instruments effectuant des balayages rapides et il limitait aussi considérablement le développement des applications graphiques. Par exemple, pour le diffractomètre à quatre cercles D8 cela aboutissait à une perte d'efficacité de plus de 50 % (50 % de temps de mesure, 50 % d'attente de réponse de l'ordinateur), autrement dit cela revenait à perdre plus de la moitié du flux de neutron disponible ! Il faudra attendre l'arrivée de Mossbauer pour mettre fin à cette situation intenable et l'abandon de cette préférence nationale avec l'installation d'un ordinateur par instrument (PDP-11 ou Solar⁸), ce qui aboutira à un gain d'efficacité substantiel pour la majorité d'entre eux.

Bien entendu, il était aussi nécessaire d'avoir accès à des moyens lourds pour exploiter les données. Au début, jusqu'en 1973, ceci fut possible à l'aide d'un terminal lourd (lourd surtout par son poids) implanté à l'ILL, qui était connecté à l'ordinateur, une machine IBM 360 du centre de calcul de l'université. Yvon Siret vint aussi le 1^{er} janvier 1971 de ce centre, pour s'occuper du calcul scientifique à l'ILL.

L'ILL et l'informatique désacralisée

Un excellent exemple d'esprit de liberté et de pouvoir rendu aux utilisateurs est celui de l'informatique des débuts de l'ILL. À cette époque, largement antérieure à l'ordinateur personnel, l'ordinateur central était une machine volumineuse et très coûteuse, enfermée dans une salle aux accès strictement contrôlés et gérée par un petit groupe d'experts jaloux de leur savoir et maintenant soigneusement les utilisateurs à distance.

À la grande surprise des nouveaux arrivants, aucune de ces barrières n'existait à l'ILL. Le terminal lourd connecté sur un ordinateur IBM 360/50 de l'IMAG (université Joseph Fourier)

⁸ Ces calculateurs français furent les derniers achetés pour satisfaire la préférence nationale. Ces calculateurs assez rapides manquaient de logiciels. Ils durent être remplacés assez rapidement (mais trop lentement pour les utilisateurs) par des PDP-11.

fut vite remplacé (1973) par un ordinateur DEC system 10 de conception bien plus moderne et bien mieux adapté au monde scientifique. Y. Siret, fit ce choix, incroyable à l'époque, de l'informatique porte ouverte. Autrement dit, en l'absence des opérateurs, n'importe quel physicien s'étant préalablement un peu informé pouvait rallumer la machine la nuit ou le weekend, monter/démonter les bandes magnétiques, monter/démonter les disques durs amovibles, etc. Y. Siret, soutenu par la direction de l'ILL, avait fait le pari de l'intelligence et du sérieux des scientifiques de l'ILL, à juste titre puisque, en plus de dix années d'exploitation de l'ordinateur central DEC system 10, il n'y eut aucun problème notable.

Ce choix osé pour l'époque aura eu de nombreux effets bénéfiques. D'abord le coûteux matériel informatique était bien mieux rentabilisé car les jeunes physiciens ne comptaient ni leurs nuits ni leurs weekends. Ensuite, les physiciens de l'ILL ont acquis très vite une excellente compétence, y compris au niveau système, qui leur permettait de discuter d'égal à égal avec les professionnels de l'informatique. De ce fait, ils purent constamment peser pour que les choix de l'ILL soient arbitrés en faveur des utilisateurs et non de l'informatique informatique qui sévissait dans bien des laboratoires à cette époque.

Électronique et détecteurs

C'était le domaine d'Anton Axmann, arrivé à l'ILL le 1^{er} juillet 1969. Axmann avait une expérience à la fois en électronique et en physique. Il avait travaillé dans l'industrie, mais aussi à Jülich avec Tasso Springer. Cette formation en avait fait un candidat idéal pour prendre en charge l'électronique à l'ILL. Une partie considérable de l'électronique concernait les détecteurs. Les neutrons, particules neutres, ne peuvent pas être détectés directement. Il faut au préalable que les neutrons produisent, à la suite d'une réaction nucléaire, des particules chargées qui sont ensuite détectées. Les réactions les plus utilisées sont celles qui suivent l'absorption des neutrons par du bore (le plus souvent sous la forme gazeuse BF_3), de l'hélium 3, du lithium ou du gadolinium. Ce n'est pas le lieu d'exposer toutes les variantes utilisées dans la réalisation des détecteurs. Je dirai simplement que dans de nombreuses expériences, il est très avantageux de pouvoir collecter simultanément les neutrons diffusés à différents angles. C'est le cas en particulier de la diffusion aux petits angles. Le plus souvent, ce résultat est atteint à l'aide de détecteurs bidimensionnels, dans lesquels la disposition des électrodes permet de localiser les points d'impact

des neutrons, avec une résolution de l'ordre de 1 centimètre pour les détecteurs utilisant du gaz et de l'ordre du millimètre dans les détecteurs utilisant un matériau absorbant solide.

L'aide du CENG, en particulier de Roger Gariod, fut essentielle pour le développement de ces multidétecteurs.

Environnement des échantillons

Une grande partie des expériences doit être réalisée sur des échantillons à hautes ou basses températures, éventuellement sous pression ou placés dans un champ magnétique. Un avantage des neutrons par rapport aux rayons X est le fait qu'ils traversent bien mieux des enceintes métalliques ; il est donc alors plus facile de créer un environnement adéquat quand il est nécessaire par l'étude à réaliser.

Les premiers efforts furent faits pour les *basses températures*. Grenoble fournissait un excellent support dans ce domaine. J'ai déjà mentionné le laboratoire CNRS (Centre de recherches sur les très basses températures) dirigé jusqu'à sa mort en 1968 par Louis Weil, avec lequel nous avons construit une source froide pour Saclay. Un service de basse température avait été développé au CENG par Weil. De plus, la société Air Liquide avait une antenne à Fontaine, dans la banlieue de Grenoble. Louis Weil et Albert Lacaze avaient créé une société dénommée TBT (Très Basses Températures) pour la valorisation de leur savoir-faire. Cette société avait été reprise par la société Air Liquide. Un des tout premiers recrutements fut, dès 1969, celui de Gabriel Prati, technicien de TBT, suivi en 1971 par celui de Serge Pujol venant lui aussi de TBT. Dans un premier temps, des cryostats furent commandés à des firmes allemandes et françaises. Il apparut vite que ce matériel commercial n'était pas très bien adapté aux besoins, en particulier pour être utilisé par des utilisateurs novices en cryogénie. Un ingénieur venu du CEA, Dominique Brochier, fut recruté. Avec Pujol, il lança la construction de cryostats à l'ILL, susceptibles d'être utilisés par des non-spécialistes (souvent totalement débutants) et pouvant être installés, suivant les besoins, d'un appareil à l'autre. Ce fut un remarquable succès. À l'origine, nous avions pensé ne rien faire pour récupérer l'hélium⁹ gazeux que crachait chacun de ces cryostats. La dépense qui en résultait obligea à mettre en place une installation de récupération du gaz qui, quoique coûteuse, fut rapidement amortie.

⁹ L'hélium est un gaz rare, donc coûteux.

Pour les *hautes températures*, il a fallu attendre la venue, en 1974, de Pierre Aldebert qui arrivait du laboratoire CNRS du four solaire, pour préparer une thèse sur des oxydes réfractaires à haute température. Les *hautes pressions* furent mises en place dès 1971 par Christian Vettier (maintenant directeur adjoint français), qui à l'époque, lui aussi, préparait, sous la direction de Daniel Bloch du laboratoire de Louis Néel, une thèse dans laquelle il étudiait des échantillons sous pression.

L'importance des *champs magnétiques intenses* fut reconnue plus tardivement. Dans ce domaine aussi, l'élément clé fut là encore un étudiant, Francis Tasset, qui préparait une thèse sous la direction de Jacques Schweitzer du laboratoire de cristallographie du CEA-CNRS.

Quelques chiffres montrent l'importance de ces environnements des échantillons : en 2005, le pourcentage des expériences¹⁰ nécessitant l'un au moins de ces conditionnements :

– basse température	48 %
– haute température	10 %
– haute pression	4 %
– champ magnétique	11 %
– combinaison de plusieurs environnements	9 %

Au total, un effort considérable fut fait pour mettre à la disposition des utilisateurs tout l'équipement pour étudier leurs échantillons dans l'environnement souhaité. Ce fut certainement une grande réussite qui a beaucoup contribué au succès de l'ILL. Les étudiants préparant une thèse furent certainement des éléments moteurs, mais rien de tout cela n'aurait pu être réalisé sans un support technique très solide et les moyens nécessaires (ateliers).

Mécanique

La mécanique représentait évidemment un élément essentiel dans une période où la construction d'appareils était l'activité principale. Les principaux responsables étaient Guy Gobert qui s'occupait du bureau d'études et de l'atelier, Jean-Claude Faudou (arrivé le 1^{er} janvier 1970) qui se spécialisa dans les équipements de physique nucléaire et Jean Courteau qui avait la charge de la maintenance. Tous ces ingénieurs dépendaient de Michel Jacquemain. Notons qu'il y avait à cette époque un important atelier avec plusieurs ouvriers professionnels. Ceci n'empêchait pas de faire appel aussi à l'industrie, en

¹⁰ Je remercie Alain Filhol de m'avoir communiqué ces chiffres.

particulier locale, si nécessaire. Ceci a eu le mérite d'encourager ces entreprises à développer la mécanique de précision, un savoir-faire qui, plus tard, leur fut utile pour pouvoir travailler pour l'ESRF. Actuellement le personnel de l'ILL ne comprend plus d'ouvriers. Toutes les réalisations doivent être sous-traitées dans des entreprises extérieures. Et pourtant il faut encore construire de nouveaux instruments et améliorer ceux existant.

Fin 1970, il y avait à l'ILL toutes les compétences et le personnel nécessaire pour mettre en œuvre le programme de fonctionnement que Maier-Leibnitz avait considéré comme nécessaire à la réussite de l'entreprise.

Heureusement la construction du réacteur avait été accompagnée de celle d'un important *bâtiment pour les physiciens*. Un architecte allemand, M. Schilling en fut chargé. C'était certainement un bon architecte, très attaché à l'apparence extérieure du bâtiment. Nous avons bien failli avoir un système centralisé qui aurait commandé l'ouverture simultanée (ou la fermeture) de toutes les lamelles de stores de l'ensemble du bâtiment, destinées à protéger des excès de soleil. Finalement nous avons eu un bâtiment de très bonne qualité, bien fonctionnel. Des tableaux noirs furent installés, à notre demande, sur chaque palier pour encourager la discussion. Les bureaux des directeurs étaient (et sont toujours) au premier étage, à côté de la bibliothèque (qui hélas a été installée dans le bâtiment commun ILL-ESRF, ce qui en rend l'accès plus difficile). Une cafétéria était installée au dernier étage. C'était aussi un lieu de discussion, doté lui aussi de tableaux. Tout le monde pouvait y rencontrer les directeurs. Des bureaux sont maintenant installés à sa place. Le bâtiment fut livré à la fin de 1970, ce qui a permis d'accueillir le nouveau personnel qui avait plus que doublé au cours de l'année.

Maier-Leibnitz connaissait l'existence de la loi française de 1951 imposant aux constructions scolaires l'obligation d'investir 1 % du coût à des œuvres d'art originales destinées à s'intégrer dans l'architecture. Une loi analogue existait aussi en Allemagne. Comme l'ILL n'est pas une construction scolaire, la loi française ne s'imposait pas dans notre cas. Maier-Leibnitz proposa cependant au comité de direction de l'appliquer¹¹. Cette requête fut diversement accueillie, mais acceptée, tant était grand le prestige de Maier-Leibnitz auprès de ce comité.

¹¹ Ce en quoi il était précurseur, puisque, en 2002, son application fut étendue à l'ensemble des constructions des administrations de l'État et de leurs établissements publics administratifs.

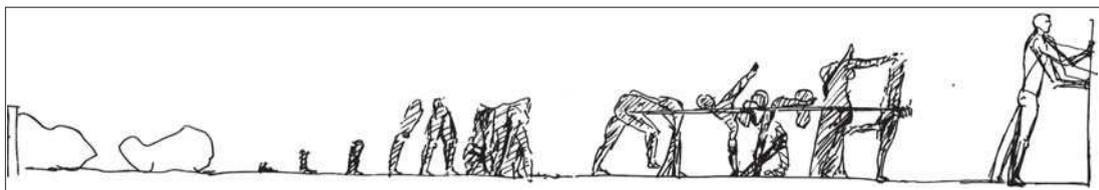


Figure 5.10. Dessin préparatoire de l'ensemble sculptural proposé par Ipoustéguy.

Il restait à trouver le ou les artistes auxquels s'adresser. Nous fumes aidés en cela par Monsieur Alfred Bauer du centre de Karlsruhe. La première idée fut de demander à Calder de réaliser un stable (il en avait fait un, placé devant la gare, pour la ville de Grenoble). Mais les prix étaient dissuasifs, dépassant de beaucoup le 1 %. Pour la même raison, il nous fallut écarter l'idée de faire appel à des œuvres de Picasso ou de Max Ernst.

Yves Droulers, qui était conseiller municipal de Grenoble, nous mis alors en relation avec la Maison de la culture de la ville. C'est là que le nom d'Ipoustéguy (fig. 5.11) (né en 1920 en Lorraine) fut avancé pour la première fois. À cette époque, il était encore très peu connu en France. Contacté en 1970, l'artiste fit cette même année un dessin de l'ensemble qu'il nous proposait (fig. 5.10) et qu'il appelait « L'accomplissement de l'homme vers son unité » (l'interprétation par l'artiste de son œuvre est donnée en annexe 7). Nous fumes séduits. Mais nous ne nous contentâmes pas de notre avis, et Alfred Bauer soumit le projet à divers experts, dont le Dr Fuchs, directeur de la Kunsthalle de Mannheim, particulièrement compétent en sculpture moderne (il avait rassemblé une collection exemplaire dans son musée). En même temps, pour assurer le caractère binational de l'ILL, un second projet destiné à prendre place dans l'amphithéâtre, lui fut également soumis. Réalisé par l'artiste allemand Loth, né la même année qu'Ipoustéguy, il était appelé « signal anthropomorphe ». De son jugement, je retiendrai l'avis suivant : « *La conception proposée par Ipoustéguy promet une composition, unique jusqu'ici, de grande valeur artistique. . . L'érection à l'endroit envisagé garantirait notamment la mise en valeur du caractère particulier de la sculpture. En fin de compte Ipoustéguy démontre ici – et d'ailleurs Loth aussi – qu'il se sent intégré dans la tradition de l'art de Rodin* ». Le Dr Fuchs donna aussi un avis très favorable au projet de Loth. De son côté, le Dr Beye, directeur du musée de Stuttgart, dit que « *l'ambiance de l'ouvrage d'Ipoustéguy est particulièrement appropriée* ». Il ajouta « *Ipoustéguy est considéré comme le sculpteur français le plus important de notre époque* ». Devant un tel concert d'éloges, le comité de direction donna son approbation. L'ensemble d'Ipoustéguy (fig. 5.12) fut terminé en mai 1972 et installé le



Figure 5.11. Ipoustéguy en 2003.



Figure 5.12. Ensemble réalisé par Ipoustéguy, tel qu'il est devant l'entrée du bâtiment principal de l'ILL.

mois suivant. Son coût fut de 200 000 DEM (l'équivalent d'environ 400 000 euros), celui de l'œuvre de Loth de 18 000 DEM. Soit au total une dépense très inférieure au 1 % du prix d'un bâtiment coûtant 30 millions de DEM. L'achat d'une œuvre de Schlemmer, un artiste du Bauhaus du début du XX^e siècle, fut envisagé, mais ne fut finalement pas réalisé.

La sculpture, ensemble monumental dont les divers composants sont répartis sur une dalle de béton de 20 m de long, fut installée par l'artiste en 1972 le long du chemin conduisant à l'entrée du bâtiment. Peu après, elle reçut la visite de représentants de la municipalité qui se réjouissaient de l'implantation d'une nouvelle œuvre d'art à Grenoble. À cette époque, le site était ouvert et tout le monde pouvait voir le travail d'Ipoustéguy. Ce n'est malheureusement plus le cas. En effet, la présence d'un réacteur impose, à juste titre, dans le cadre des mesures de sécurité exigées par le plan Vigipirate de lutte contre le terrorisme, un contrôle très strict de l'entrée du site.

La sculpture proposée par Loth fut commandée et installée à l'intérieur du bâtiment dans le hall d'entrée. Depuis elle a été mise sur une pelouse extérieure.

Chapitre 6

Début de la recherche avec le réacteur et arrivée des Britanniques

Début de la recherche

L'année 1972 est celle du passage de l'ILL de l'adolescence à l'âge adulte. Le réacteur fonctionne à pleine puissance depuis décembre 1971. En mai 1972, les sources froide et chaude sont en fonctionnement. On peut donc dire que la phase de construction du réacteur est terminée. Son exploitation est désormais confiée à un chef de service réacteur. Ce dernier a une responsabilité importante et un rôle majeur dans le fonctionnement de l'Institut. Dans les premières années, cette fonction fut assumée par Yves Droulers, puis de 1979 à 1989 par Franco Franzetti. Tous deux venaient du CENG. Leur succession fut confiée à un ingénieur allemand¹, Ekkehardt Bauer, membre de l'équipe de Franzetti. Nous verrons plus loin qu'il eut une responsabilité particulièrement importante quand il fallut reconstruire le réacteur. En 2002, Hervé Guyon, venu de Saclay, l'a remplacé.

Ce changement dans le statut du réacteur s'accompagne du remplacement du directeur. Maier-Leibnitz partit à la fin du mois de janvier 1972 ; il avait présidé à la construction et à la mise en route d'un grand instrument de recherche, équipé des instruments nécessaires pour une exploitation optimale. C'était la réalisation d'un ouvrage qu'il avait ardemment désiré. Il partait au moment où cet instrument allait permettre d'obtenir les premiers résultats scientifiques. L'organisation

¹ Qui dut pour cela prendre la nationalité française.



Figure 6.1. Rodolph Mossbauer.

qu'il avait souhaitée était en place. Elle le restera sans modifications majeures jusqu'à aujourd'hui.

Il est remplacé au 1^{er} mars par Rudolf Mossbauer (fig. 6.1), récent prix Nobel pour la découverte de l'effet qui porte son nom. Le choix de Mossbauer, comme directeur, pouvait surprendre. Il n'avait aucune expérience avec les neutrons. Mais il était un ancien étudiant de Maier-Leibnitz. Il est, par ailleurs, difficile d'imaginer deux personnalités plus différentes. Pour Maier-Leibnitz, il n'y avait pas de frontière entre la vie professionnelle et la vie privée. Il recevait beaucoup chez lui et c'était même pour lui une façon de prendre contact avec les autres. Son épouse était très présente dans la vie sociale de l'Institut. Pour Mossbauer, cette frontière était totalement étanche. Cela dit, il fut un excellent directeur. Mes rapports avec lui pendant les deux ans que j'ai, à sa demande, passé avec lui furent excellents. Le rôle de ces deux directeurs successifs était très différent : Maier-Leibnitz avait à créer un institut, Mossbauer avait à le faire fonctionner. Les rapports annuels reflètent bien les différences entre les deux styles de direction ; disparition des grandes considérations sur la politique de l'ILL, mais un exposé très ordonné des faits survenus dans l'année. Plusieurs décisions importantes furent prises dès la première année, aucune ne mettant en cause la structure mise en place par Maier-Leibnitz. En particulier, je pense aux quatre points suivants.

1) *La création d'un secrétariat scientifique.* Sa fonction était de coordonner les aides que l'ILL doit apporter aux utilisateurs extérieurs (qui sont les utilisateurs majoritaires). Bernd Maier, assisté par une excellente secrétaire, Christel Kazimierczak, fut chargé de cette tâche essentielle pour la mise en pratique de la politique scientifique qu'avait voulue Maier-Leibnitz. L'aide à apporter comprend en particulier la nomination d'un *local contact*, qui doit assister l'utilisateur extérieur et, si nécessaire, lui assurer une assistance technique. Cette assistance aux visiteurs inclut un remboursement des frais de voyage (pour des propositions acceptées par les sous-comités et le conseil scientifique).

2) *L'abandon du groupe de physique théorique implanté à Munich,* pour regrouper les chercheurs à Grenoble. Philippe Nozières fut recruté en octobre 1972, ce qui permettait à ce groupe de renforcer son statut international.

3) *La formalisation des sous-comités du conseil scientifique.* De fait, ces sous-comités avaient fonctionné dès 1966. Mais maintenant ils avaient la pleine responsabilité de choisir, deux fois par an, les expériences bénéficiant d'un temps de faisceau. Ces sous-comités traitaient (et traitent toujours) de :

- physique nucléaire ;
- mouvements dans les cristaux (phonons) ;
- structures (cristallographiques et magnétiques) ;
- liquides, gaz, et substances amorphes ;
- imperfections dans les solides ;
- chimie ;
- biologie.

On voit qu'à chacun de ces sous-comités correspondait un des collèges de l'Institut. Ce système s'est avéré efficace et perdure encore.

4) *L'achat d'un ordinateur DEC 10.* Cet ordinateur qui a été en service de 1973 à 1986 a avantageusement remplacé la liaison avec le centre de calcul de l'université de Grenoble.

Le changement de directeur a été rapidement suivi (sans qu'il y ait la moindre corrélation entre les deux) d'un changement de responsable administratif : Hassenclever fut remplacé à partir du 1^{er} octobre 1973 par Plattenteeich, qui avait représenté le ministère allemand de la recherche au comité de direction. Tous les responsables administratifs furent de nationalité allemande, comme tous les responsables du réacteur furent de nationalité française. Il a eu successivement Grillo (1^{er} janvier 1978 au 30 avril 1983), Eitner (1^{er} mai 1983 au 30 avril 1988), Spilker (1^{er} juin 1988 au 31 juillet 1994), Lettow (1^{er} août 1994 au 31 juillet 2001) et actuellement König.

J'ai déjà brièvement décrit les premiers instruments mis en construction. Le tableau 6.1 suivant, repris du rapport d'activité de 1972, montre où en était au cours de cette année l'avancement de la construction de ces appareillages. La dernière colonne de ce tableau donne la date à laquelle l'instrument était (ou était prévu d'être) en fonctionnement de routine. On voit que finalement peu d'instruments furent absolument prêts quand le réacteur fut pleinement opérationnel avec ses sources froide et chaude fin mai 1972. La plupart étaient en période de test, installés à leurs places respectives autour du réacteur.

On voit apparaître dans ce tableau quelques instruments qui ne figuraient pas dans la liste, établie en 1969, donnée plus haut. L'un d'eux est IN 10, un spectromètre qui utilise la rétro-diffusion. Le principe en fut proposé en 1966 par Maier-Leibnitz et testé en 1969 à Munich par Alefeld et Heidemann². L'idée est d'utiliser, pour la monochromatisation des neutrons

² Le principe en avait été mis en œuvre auparavant (en 1954) dans un contexte de filtre de neutrons par Egelstaff et Pease.

Tableau 6.1. (Tel qu'il figure dans le rapport d'activité de 1972).

IN1	Trois axes	Source chaude	Fonctionnement de routine	Février 1973
IN2	Trois axes	Canal thermique	Fonctionnement de routine	Octobre 1972
IN3	Trois axes	Guide thermique	Montage terminé. En test	Avril 1973
IN4	Cristal tournant	Canal thermique	Montage terminé. En test	Avril 1973
IN5	Multichopper	Guide froid	Montage presque terminé. En test	Avril 1973
IN6	Trois axes	Source chaude	Début du montage prévu en mai 1973	Avril 1974
IN7	Chopper statistique	Canal thermique	Montage terminé. En Test	Avril 1973
IN8	Trois axes	Canal thermique	Pièces en attente	Avril 1973
IN9		Guide froid	En test	Automne 1973
IN10	Rétrodiffusion	Guide froid	En progrès	Début 1973
D1A	Diffract. à 2 axes	Guide thermique	Montage terminé	Mai 1973
D1B	Diffract. à 2 axes	Guide thermique	Montage terminé	Mai 1973
D2	Diffract. à 2 axes	Canal thermique	Fonctionnement de routine	Août 1972
D4	Diffract. à 2 axes	Source chaude	Fonctionnement de routine	Février 1973
D5	3 axes avec analyse de polarisation	Source chaude	Montage terminé ; mise au point	Avril 1973
D6	Diffract. hérisson	Guide thermique	Montage terminé ; problème de bruit de fond	?
D7	Diffusion diffuse	Guide froid	En fonctionnement	Mars 1973
D8	4 cercles	Canal thermique	Montage presque terminé	Mai 1973
D9	4 cercles	Canal thermique	Fabrication en cours	Mars 1974
D10A		Guide thermique		Fin 1973
D10B		Guide thermique		Novembre 1972
D11	Diff. Petits angles	Guide froid	En fonctionnement	Juillet 1972
D12	Laue modifié	Guide thermique	Montage commencé	Fin 1973
PN1	Lohengrin	Canal thermique	Montage pas terminé	Août 1973
PN2	Électrons de conversion	Canal thermique	En montage	Août 1973
PN3	Spectromètre Υ	Canal traversier	En fonctionnement	Mars 1973
PN4				

et l'analyse des neutrons diffusés par l'échantillon, des angles de Bragg très proche de 90 degrés. Dans ces conditions, la divergence angulaire du faisceau n'affecte la résolution en énergie qu'au second ordre et on peut donc utiliser d'assez grandes divergences du faisceau tout en ayant une très bonne résolution en énergie, qui peut atteindre $0,15 \mu\text{eV}$. Le balayage en énergie est réalisé par un effet Doppler obtenu par un mouvement, parallèlement au faisceau, du monochromateur ou de l'analyseur. La construction de cet instrument lancée par

Maier-Leibnitz a failli être arrêtée, car au cours de l'année 1972 un physicien hongrois, Ferenc Mezei, rejoignit l'ILL apportant avec lui une technique qu'il avait inventée, l'écho de spin avec neutrons (qui a été décrite plus haut), permettant d'obtenir une résolution en énergie encore meilleure. Finalement il fut décidé de construire les deux instruments. En fait, ils ont des applications différentes. L'appareil à écho de spin est parfaitement adapté pour étudier des systèmes dans lesquels il y a plusieurs temps de relaxation. Par contre, il ne peut pas résoudre un ensemble de raies spectrales. Au cours des années suivantes, le succès de ces deux techniques d'analyse a conduit à la construction de plusieurs versions de chacun de ces deux instruments.

Dans ce tableau il est également fait mention des premiers problèmes rencontrés par le diffractomètre hérisson D6. Ces difficultés conduisirent finalement à l'abandon du projet. Le diffractomètre à haute résolution D1A permettait d'obtenir une haute résolution, mais les intensités étaient si faibles qu'il était pratiquement inutilisable. Il ne devint opérationnel que lorsque, après l'arrivée des Britanniques, Alan Hewat modifia les collimateurs en utilisant le savoir-faire du *Rutherford Laboratory* (un centre de recherche britannique) et en utilisant plusieurs détecteurs.

Sur les équipements prêts, des expériences furent aussitôt réalisées. Sur IN 2, Steiner et Dorner mesurèrent les ondes de spin dans une substance ferromagnétique unidimensionnelle CsNiF₃, travail dont les résultats furent publiés dès 1972. Sur l'appareil de diffusion aux petits angles, les premières expériences de test furent réalisées en septembre 1972 par Konrad Ibel et Henrich Stuhmann sur la myoglobine et par Renouprez sur SiO₂.

Poursuite de l'activité dans le domaine de l'optique des neutrons

Le départ de Maier-Leibnitz n'a pas entraîné un arrêt de l'activité dans le domaine de l'optique des neutrons. Au contraire ce domaine s'est étendu grâce à l'apparition d'une nouvelle activité, celle du développement des supermiroirs. Les supermiroirs furent inventés par Ferenc Mezei³. Le point de départ est un travail réalisé à Brookhaven par Benno Schoenborn *et al.*⁴ dans lequel ils démontraient qu'une suite alternée de

³ Communications on physics, 1976, 1, p. 81-85.

⁴ SCHOENBORN B.P., CASPAR D.L., KAMMERER O.F., J. Appl. Cryst., 1974, 7, p. 508-510.

couches de métaux différents évaporés sur un support plan forme un cristal à une seule dimension qui peut servir de monochromateur. Le principe du supermiroir consiste à produire une séquence de larges pics de Bragg juste au-delà de l'angle de réflexion critique. Ceci est obtenu en variant progressivement l'épaisseur des couches déposées. On obtient ainsi un miroir qui, après le domaine classique de réflexion critique, se comporte comme un miroir un peu moins efficace (de l'ordre de 70 %), mais fonctionnant jusqu'à des angles pouvant être quatre fois plus grands que l'angle de réflexion critique ; d'où le nom de supermiroir. Si l'on se limite à des angles seulement deux fois plus grands que celui du nickel, l'efficacité atteint 92 %. C'est ce qui a permis un remplacement progressif des miroirs des guides de neutrons par des supermiroirs. Tout cela suppose un grand travail de recherche et de mise au point, en particulier pour améliorer la qualité des dépôts. En utilisant un matériau magnétique pour l'une des couches, les supermiroirs peuvent être utilisés pour produire des neutrons polarisés. Il a fallu faire encore beaucoup de recherche pour trouver les matériaux les plus efficaces. C'est Otto Schärpf qui s'est occupé de cette partie de l'optique des neutrons.

Mais l'événement le plus important pour l'ILL de l'époque Mossbauer fut certainement la venue des Britanniques comme troisième partenaire. Ce fut le résultat de très longues négociations qui débutèrent du temps de Maier-Leibnitz.

Arrivée des Britanniques

La négociation⁵ avec les Britanniques pour leur adhésion à l'ILL fut de nature totalement différente de celle qui a conduit à la création de l'Institut. La négociation entre Français et Allemands avait pour objet de construire un réacteur qui restait à définir avec précision. J'ai plus haut montré tous les points qu'il avait fallu régler. Cela a pris un peu plus de deux ans. La négociation avec les Britanniques a pris encore plus de temps alors qu'il n'y avait que très peu de points techniques à négocier puisque le réacteur était en fonctionnement avec ses instruments utilisables ou prêts à l'être. Cette lenteur des pourparlers est la conséquence des tergiversations des Britanniques qui hésitaient entre deux positions : lutter pour obtenir un réacteur haut flux purement britannique ou

⁵ Cette section a été rédigée à l'aide des copies des documents originaux (lettres, compte rendu de réunion, mémorandum) que j'ai en ma possession.

adhérer à l'ILL. Le projet de 1962 avait été amélioré et l'utilisation de guides de neutrons était maintenant envisagée. Quand je parle de Britanniques, je pense en fait au *Science Research Council* (SRC) qui a été notre interlocuteur pendant ces années de discussions et qui est maintenant (sous son nouveau nom de SERC) le partenaire des associés allemands (GFK, puis FZ Jülich) et français (CEA et CNRS) dans la société civile qui gère l'ILL. Les négociations furent entamées alors que Maier-Leibnitz était encore directeur et aboutirent alors que Mossbauer lui avait succédé.

La première action concrète fut une visite de l'ILL effectuée, les 6 et 7 mars 1970 par une petite délégation du SRC. Cette délégation était composée de Bill Mitchell (fig. 6.2) qui était le président du « *Neutron beam research committee* », et des docteurs Valentine et Wade et de Messieurs Wood et Jolliffe. À cette date, le réacteur de l'ILL était en pleine construction et les pré-études pour le projet britannique assez avancées. Le compte rendu de cette visite, rédigé par Jolliffe pour le SRC, est intéressant à lire (sa conclusion est reproduite dans l'annexe 3). On sent un certain scepticisme sur la possibilité pour l'ILL de respecter le planning annoncé (« *we are doubtful of this being achieved* ») et il est frappant que l'accent soit mis sur les soit disant difficultés de la collaboration franco-allemande. Comme je le dis par ailleurs, ces difficultés n'ont en réalité jamais existé. Une collaboration entre l'ILL et le SRC fut évoquée, qui serait utile, pour les Britanniques, pendant les cinq prochaines années, c'est-à-dire jusqu'à l'achèvement du réacteur du Royaume-Uni. À aucun moment, ne fut évoquée une participation du SRC à l'ILL.

La seconde visite britannique fut celle d'une délégation du *Council for scientific policy*, un organisme composé de scientifiques de haut niveau, chargé de conseiller le gouvernement en matière de politique scientifique. La délégation comprenait le professeur Dainton, Sir John Kendrew, le Dr Merrison, M. Feilden et M. Embling, sous-secrétaire d'état pour la science et l'éducation. La première journée s'est déroulée à Paris à la DGRST avec Pierre Aigrain qui présidait à cette époque le comité dit « des sages », dont le rôle était auprès du gouvernement français analogue à celui du groupe de visiteurs auprès du gouvernement britannique. Le lendemain, ils passèrent toute la journée du 6 novembre 1970 à Grenoble. Il était prévu une matinée au CENG. Louis Néel inclut dans cette matinée une visite de l'ILL où je les reçus. Quoique l'éventuelle participation du SRC à l'ILL n'ait pas été vraiment discutée, je pense que, à cause de la bonne impression qu'eurent les



Figure 6.2. Bill Mitchell en conversation avec Tasso Springer.

visiteurs du site de Grenoble et de l'ILL en particulier, cette visite eut une certaine importance quand deux ans plus tard le gouvernement britannique prit sa décision. Cette visite eut aussi des conséquences pour l'EMBL. J'y reviendrai plus loin quand je traiterai de la création de l'antenne EMBL auprès de l'ILL.

Une nouvelle visite des représentants du SRC eut lieu le 2 décembre 1970. La discussion porta surtout sur les programmes scientifiques avec des contributions de Mitchell (programmes britanniques), Allen (polymères) et White (dynamique des liquides). Ce fut pour nous l'occasion de mesurer l'avance des Britanniques dans certains domaines d'application des neutrons, en particulier pour étudier les polymères. Une nouvelle visite eut lieu les 25 et 26 février 1971. La possibilité d'un contrat de collaboration scientifique fut pour la première fois abordée sérieusement et les discussions à ce sujet firent l'objet d'une présentation par Maier-Leibnitz au comité de direction suivant. Son impression était que le SRC n'espérait plus une décision positive pour la construction d'un réacteur en Grande-Bretagne et qu'il était donc intéressé par une participation à long terme à l'ILL. Cependant le conseil du SRC, lors d'une réunion du 21 avril 1971, recommanda au ministère la construction d'un réacteur en Grande-Bretagne, demande qui fut l'objet d'un article dans le *Financial Times* du 1^{er} juin. Il demandait en même temps la possibilité d'utiliser le réacteur de l'ILL au niveau de 10 % de ses capacités.

Le 19 juin 1971, Mitchell rédigeait un document énumérant les expériences que les chercheurs du SRC souhaitaient réaliser en 1972 à l'ILL et des instruments appropriés. Pour cela, il était proposé d'acheter 10 % du temps de fonctionnement du réacteur. Pour clarifier les discussions, le comité de direction de l'ILL nomma un sous-groupe (Messieurs Greifel, Loosch, Creyssel et Horowitz) chargé de mener les négociations avec le SRC dont la délégation était conduite par Sir Brian Flowers. Trois réunions se tinrent en 1971 (le 12 juillet, 28 octobre et 14 décembre).

Le 25 octobre, le ministère français du Développement industriel et scientifique exprima, par écrit, aux associés français, son veto à une participation britannique au niveau de 10 %. La raison invoquée était que le poids scientifique de la Grande-Bretagne, en général et en particulier dans le domaine de la recherche utilisant un faisceau de neutrons, était tel que ce pourcentage ne pourrait certainement pas permettre de satisfaire leurs besoins. Notons que le *Financial Times* publiait le 30 septembre 1971 un article annonçant une décision

imminente du gouvernement pour le financement du réacteur britannique. L'année 1971 s'achève donc dans un état de confusion totale, avec un ILL (ou plus précisément les associés) insistant sur une adhésion complète du SRC (et agissant pour la faciliter en améliorant les conditions financières) et ce dernier continuant à se battre pour avoir son propre réacteur. Cette situation de blocage fut bien décrite dans une lettre (reproduite en annexe 4) adressée le 23 ou 24 janvier 1972 par Flowers à Creyssel alors président du comité de direction.

Rien de nouveau (au niveau des négociations) ne se produisit pendant le premier semestre 1972. Une réunion entre ILL et SRC eut lieu le 27 juin à Grenoble au cours de laquelle on n'a rien enregistré de nouveau, mais Horowitz note qu'elle s'est déroulée dans une excellente atmosphère, ce qui n'avait certainement pas toujours été le cas auparavant. On peut donner deux explications de ce changement d'atmosphère. La première est qu'au début de la réunion, Mössbauer, maintenant directeur de l'ILL, avait annoncé la mise en route réussie des sources chaudes et froides. Ceci démontrait le succès de la construction d'un réacteur maintenant pleinement opérationnel. La deuxième raison est sans doute que Flowers était au courant de la décision qu'allait prendre son gouvernement d'autoriser l'ouverture de négociations avec l'ILL pour que le SRC devienne partenaire de l'ILL. Cette décision fut effectivement communiquée à Creyssel le 23 août et rendue officielle le 31 août 1972. Elle fut aussitôt critiquée⁶ par Mitchell, président du comité du SRC pour la recherche avec les faisceaux de neutrons. Selon Mitchell on avait pris la mauvaise décision, mais il était heureux qu'une décision ait été enfin prise et il ferait de son mieux pour que les négociations aboutissent.

Les négociations officielles débutèrent le 29 septembre 1972. Il fut convenu très facilement de modifier le moins possible les statuts de l'ILL, mais de faire simplement les ajustements rendus indispensables par la présence d'un nouveau partenaire (langue de travail, composition des comités, etc.). Il ne restait qu'à s'entendre sur la façon dont seraient réglées par le SRC les dépenses d'investissement effectuées par les associés actuels (construction du réacteur et des instruments). Il fallait aussi un accord sur les nouveaux instruments rendus nécessaires par la présence d'un nouveau partenaire. Tout fut réglé à temps pour que l'adhésion britannique soit effective à partir du 1^{er} janvier 1973. Les modifications de la convention

⁶ *Nature* du 8 septembre 1972, p. 60-61.

intergouvernementale, rendues nécessaires par l'implication d'un troisième gouvernement, furent signées le 19 juillet 1974. En dehors des modifications rendues indispensables par la venue d'un troisième partenaire, le seul changement important concerne l'article 2. Au lieu que soient fixées *a priori* les sommes que les gouvernements s'engagent à mettre à la disposition des associés, il est prévu que ces sommes soient déterminées, à l'unanimité⁷, chaque année par le comité de direction. Il est à noter aussi que, à l'article 7, le préavis de dénonciation est porté d'une année à deux. Ce nouveau texte est resté tel quel jusqu'à ce jour. Les avenants successifs de 1981 et 1993 ne portent que sur la prolongation de la durée de la société. La référence au Land de Berlin devenue obsolète fut supprimée.

Il est important de noter que Mitchell, qui avait été le principal promoteur du réacteur britannique, fut toujours parfait dans ses rapports avec l'ILL et s'il n'a pu accepter d'être le premier directeur britannique, ce fut pour des raisons purement familiales. De fait, il en assumait en pratique la responsabilité au cours des premiers mois, entre janvier et mai 1973 en attendant l'arrivée de Lomer. C'est avec lui que furent décidés les premiers recrutements de chercheurs venus de Grande-Bretagne (en particulier Sax Mason, Julia Higgins, Jo Zaccai, Stephen Lovesey, Alan Hewat, Bill Stirling, etc. qui arrivèrent à Grenoble entre juin et novembre 1973). Ces décisions furent prises lors des réunions avec lui et Mossbauer dont l'une se déroula dans une brasserie du quartier latin à Paris (le Balzar). Un souvenir mémorable, bien dans la tradition des premières réunions du conseil scientifique du temps de Maier-Leibnitz dont l'une au moins se tint à la gare de Genève. Il est certain que la participation des Britanniques, qui avaient alors une position dominante dans l'utilisation des neutrons dans divers domaines de la recherche, était pour la vie scientifique de l'ILL un atout considérable. Ce sont eux qui ont initié et développé l'utilisation des neutrons en chimie et dans l'étude des polymères. L'arrivée des chercheurs britanniques fut d'ailleurs très bien acceptée par le personnel de l'ILL.

On aurait pu espérer que de si longues négociations aient conduit à un état stable qui ne serait jamais remis en cause. Ce fut le cas pendant près de vingt ans, mais nous verrons plus loin que ce ne fut malheureusement pas toujours vrai.

⁷ La pratique a montré que cette règle pouvait poser des problèmes et qu'elle pouvait conduire à un budget défini à partir des possibilités financières du pays ayant le plus de problèmes budgétaires.

Chapitre 7

Maturité

La maturité est une époque de la vie au cours de laquelle on atteint sans doute une efficacité maximum, mais où se manifestent les premières maladies plus ou moins graves. Cette période, que je situe pour l'ILL entre 1984 et 2005, a connu tous ces traits de la maturité, les négatifs comme les positifs : le nombre des utilisateurs s'est beaucoup accru, des centaines de publications résultent chaque année du travail réalisé grâce à l'ILL, mais les structures irradiées du réacteur ont connu un vieillissement progressif entraînant des périodes d'interventions plus ou moins longues qui arrêtaient momentanément la production scientifique.

Une des manifestations positives de la maturité est que le succès de l'ILL, son caractère de plus en plus international, a fait du site de Grenoble un lieu particulièrement attirant pour d'autres organisations internationales. La qualité de l'université Joseph Fourier de Grenoble et des laboratoires du CNRS qui y sont implantés et celle du CENG renforce ce pouvoir d'attraction. Un tissu industriel moderne (Hewlett-Packard, etc.) s'est aussi développé pour les mêmes raisons, et il a lui aussi contribué à renforcer le caractère séduisant de Grenoble. Le terrain, cédé par le CENG, sur lequel est installé l'ILL était suffisamment grand pour y accueillir d'autres laboratoires internationaux. C'est ainsi que sont venus successivement une antenne du Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL) puis un laboratoire gérant une source européenne de rayonnement synchrotron (ESRF). Je décrirai maintenant brièvement la genèse de ces deux instituts et ce qui a conduit à leur installation sur le site de l'ILL. Ces installations ont transformé un terrain complètement vide avant la venue de l'ILL (fig. 7.1) en un terrain bien rempli (fig. 7.2).

EMBL (laboratoire européen de biologie moléculaire)

Pour comprendre ce qui a conduit l'EMBL à créer un laboratoire à Grenoble auprès de l'ILL, il faut remonter au

Figure 7.1. Vue du terrain sur lequel sera construit le réacteur de l'ILL.



Figure 7.2. Vue actuelle du site au confluent de l'Isère et du Drac. Le grand bâtiment circulaire est celui qui abrite l'anneau de la source de rayonnement synchrotron (ESRF). Devant et à sa gauche, le bâtiment du réacteur et, adjacent à ce bâtiment, celui des physiciens de l'ILL. Le local de l'EMBL est situé entre ces deux instituts.



6 novembre 1970. À cette date, le *Scientific advisory committee* du gouvernement anglais lors d'une visite de deux jours à Grenoble se rendit à l'ILL. J'ai déjà évoqué cette visite en décrivant les péripéties qui aboutirent à la participation britannique à l'ILL. J'y reviens, car ce comité avait parmi ses membres Sir John Kendrew (1917-1997), éminent biologiste structuraliste qui avait reçu en 1962 le prix Nobel pour sa détermination, à l'aide de la cristallographie aux rayons X, de la structure de la myoglobine. Sir John était animé d'un puissant désir de développer la collaboration entre les biologistes des divers pays européens, désir qui était partagé par la plupart de ses collègues.

À cette époque le Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN), situé à Genève, était le seul cas de coopération scientifique européenne. En 1962, Viktor Weisskopf était directeur

du CERN. De même que Leo Szilard, l'un de ses amis avec lequel il avait collaboré au *Manhattan Project*¹, il regrettait que les biologistes ne fassent pas comme les physiciens nucléaires, c'est-à-dire unir leurs forces pour que l'Europe reste compétitive. Ils invitèrent aussitôt Jim Watson et John Kendrew à venir discuter avec eux à leur retour de Stockholm où tous deux venaient d'y recevoir le prix Nobel. De la naquit l'idée de promouvoir un laboratoire européen de biologie moléculaire, qui tout naturellement trouverait sa place à côté du CERN, les deux formant l'ébauche d'une université scientifique européenne. Pour aider cette promotion, l'EMBO (*European Molecular Biology Organisation*), association privée, fut créée.

En 1964, Szilard décéda et Kendrew se retrouva seul responsable du projet. Le départ de Weisskopf du CERN rendit l'implantation à côté du CERN moins attrayante, son successeur ne manifestant pas le même intérêt pour le projet. Or Kendrew attachait une grande importance au voisinage des physiciens. En 1970, le site de Heidelberg fut proposé par l'Allemagne. Comme physicien, il y avait toujours Wolfgang Gentner, un physicien nucléaire qui y avait travaillé avec Maier-Leibnitz à l'époque où le laboratoire était dirigé par Bothe. Le comportement de Gentner pendant la guerre avait été remarquable (il était parvenu à faire libérer Paul Langevin qui avait été pris comme otage). Le site de Heidelberg était bien, mais ce n'était pas comparable à une implantation à côté du CERN. Telle était la situation quand Kendrew, avec son comité, vint à Grenoble et visita l'ILL. Kendrew fut frappé par la force de la physique, principalement celle du solide, à Grenoble. Or la physique du solide est *a priori* plus proche des intérêts des biologistes que ne l'est la physique nucléaire. À la fin de la visite, il m'expliqua que l'implantation au CERN n'était plus possible et qu'il n'était pas enthousiasmé par le site d'Heidelberg. Il trouvait le site de Grenoble parfait (la France avait proposé Nice) et il me demanda d'aller aussitôt voir François Jacob pour lui en parler, ce que, très intimidé (je ne le connaissais pas et il avait la réputation d'être très froid), je fis au plus vite. François Jacob téléphona, devant moi, au ministre des Affaires étrangères (Maurice Schumann) qui lui dit que la France venait de promettre à l'Allemagne de soutenir le site de Heidelberg. Kendrew informé me dit qu'il ferait tout pour

¹ Ce nom de code couvre toute l'activité scientifique qui aboutit à la mise au point par les États-Unis de la bombe atomique. Après la guerre, Szilard quitta la physique et devint biologiste.

qu'il y ait au moins une antenne à Grenoble pour promouvoir l'utilisation des neutrons en biologie. Les premiers travaux de biologie structurale, utilisant la diffraction des neutrons venaient d'être réalisés à Brookhaven par l'un de ses anciens étudiants, Benno Schoenborn. Ce travail avait permis de préciser la structure déterminée par Kendrew qui fut convaincu de l'utilité des neutrons en biologie. La promesse fut tenue et en 1976 l'antenne de Grenoble fut en service sous la direction d'Andrew Miller (un biophysicien venu d'Oxford) et la collaboration entre ce laboratoire et l'ILL s'est avérée très fructueuse. Depuis sa création, la surface du laboratoire a été doublée et il existe un projet pour agrandir encore ce laboratoire, en collaboration avec l'ILL et l'ESRF, dont l'utilité s'est encore développée depuis la mise en route de la source très intense de rayons X de l'ESRF. Ce laboratoire a été inauguré en février 2006.

ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)

C'est Maier-Leibnitz qui, en 1975, lors de la création de la Fondation européenne pour la science (ESF) eut l'idée de satisfaire les désirs de la communauté scientifique en faisant de la construction d'une machine européenne, produisant des faisceaux intenses de rayons X, l'objet d'une réflexion de l'ESF naissant. Après de nombreux atermoiements, l'idée fut approfondie et donna lieu à la publication de livres noirs puis bleus.

Mais la concrétisation de cette idée n'a vu le jour que lorsque Brian Fender alors directeur de l'ILL formula en février 1984 la proposition d'implanter la source européenne de rayonnement sur le site de l'ILL. Auparavant (1979 et 1982), les arguments pour la construction d'une source européenne de rayonnement synchrotron avaient été exposés et bien reçus. Dans un mémoire du 21 février 1984 (reproduit dans l'annexe 5), Fender expose les arguments scientifiques et économiques qui plaident en faveur d'une implantation à côté du réacteur de l'ILL. Fender traite aussi des précautions à prendre pour que cette nouvelle source ne soit pas considérée comme une annexe de l'ILL. Ces arguments furent enfin entendus et l'*European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) créé à Grenoble sur le terrain où il y avait déjà l'ILL et l'EMBL.

La construction débuta en 1988 et les premiers utilisateurs eurent accès à la machine en 1994. Le point souligné par Fender

selon lequel l'ESRF ne devait pas être une simple annexe de l'ILL a été pris en compte. D'ailleurs, les associés qui financent l'ESRF ne sont pas exactement les mêmes que ceux de l'ILL. On retrouve l'Allemagne et la France mais aussi l'Italie (avec une contribution presque égale à celle de la Grande-Bretagne), la Suisse, les pays scandinaves, etc.

Tout naturellement une synergie s'est faite entre les deux instituts, chacun gardant son indépendance. Par exemple, Andreas Freund qui avait tant développé les monochromateurs à l'ILL, fit le même type de travail dans le cadre de l'ESRF. Un bâtiment, construit en 1992, regroupe les activités communes : une cafétéria, la bibliothèque et le groupe des théoriciens. Cela permet certainement de faire des économies. Mais il est malheureusement sûr que la disparition de la bibliothèque et de la cafétéria de son bâtiment principal est une grosse perte pour la vie scientifique et humaine de l'ILL. Plus récemment un nouveau bâtiment permet de loger les visiteurs sur le site. Cela assure des contacts permanents entre les chercheurs des deux instituts.

Un nombre croissant de projets nécessite l'utilisation des deux sources de neutrons et de rayons X. Un domaine dans lequel la complémentarité scientifique entre ces deux sources est particulièrement importante est celui de la biologie structurale. La source de rayons X très intense qu'est le synchrotron a permis des progrès considérables : cristaux de plus en plus petits, objets étudiés de plus en plus grands.

Mais dans le cas d'objets complexes, composés de plusieurs protéines, les rayons X butent sur la difficulté de savoir à laquelle de ces protéines appartient tel ou tel élément déterminé par la diffraction des rayons X. C'est ce qui se passe dans le cas du ribosome. Cette énorme (à l'échelle de la cellule) structure est l'usine dans laquelle sont synthétisées les protéines de la cellule. Elle est composée de deux sous-unités comprenant respectivement 21 protéines (et une chaîne d'ARN) et 34 protéines (et deux morceaux d'ARN). Des monocristaux ont été obtenus de chacune de ces sous-unités et même du ribosome complet. Ces monocristaux permettent d'obtenir une carte de densité électronique à haute résolution. Mais pour pouvoir interpréter au mieux ces cartes et obtenir les structures, il a été nécessaire de faire appel à la connaissance de la topologie de ces sous-unités. Cette topologie consistait en une structure à une basse résolution dans laquelle chacune des protéines était localisée. Ce dernier résultat avait été obtenu à l'aide de neutrons (principalement à Brookhaven). On sait reconstituer ces ribosomes, en tube à essai, à partir des composants. Si dans cette recons-

titution, on remplace deux protéines par leurs homologues deutériés, il est possible de déterminer la distance qui les sépare grâce à la grande différence, déjà mentionnée, du pouvoir diffusant entre le deutérium et l'hydrogène normal. Ceci permet de faire une triangulation du ribosome et représente un bel exemple de la complémentarité entre rayons X et neutrons. On aura noté au passage la nécessité de disposer de protéines deutériées. On peut les obtenir en faisant croître des bactéries dans de l'eau lourde. C'est pourquoi l'ILL en collaboration avec l'EMBL a créé une unité de deutérioration. On voit ainsi se mettre en place une collaboration entre trois partenaires (ILL, ESRF, EMBL) qui se concrétise par la construction (mentionnée plus haut) d'un bâtiment commun, qui est en cours de construction au moment où j'écris cet ouvrage. Un institut de biologie structurale (IBS), entreprise commune au CNRS et au CEA, s'associe à cette opération, ainsi que le laboratoire de virologie de l'université Joseph Fourier de Grenoble.

Mais la biologie structurale n'est pas le seul domaine dans lequel existe une complémentarité entre les neutrons et une source très intense de rayons X. Une revue de ces domaines de complémentarité a été publiée par W.G. Stirling². Un bon exemple est la détermination³ de la structure magnétique extrêmement complexe du composé UPtGe. Il a fallu utiliser les rayons X et les neutrons pour résoudre le problème que posait cette structure. Un domaine inattendu de complémentarité est celui de l'étude des phonons, réservé jusqu'alors aux neutrons. La très forte intensité des faisceaux de rayons X permet d'obtenir une résolution en énergie comparable à celle des neutrons et d'élargir le champ aux substances dans lesquelles la vitesse du son est très élevée. Il est remarquable que les neutrons continuent à être utiles malgré la très faible intensité de leurs sources. Si on suppose qu'un neutron est équivalent à un photon, l'ILL correspond à une bougie et l'ESRF à plusieurs soleils⁴.

Problème de l'école

L'adhésion de la Grande-Bretagne puis plus tard la création de l'ESRF ont rendu encore plus importante la nécessité d'offrir

² STIRLING W.G., « Complementarity between neutron and synchrotron X-ray scattering », 1998, in *Proceeding of the sixth summer school of neutron scattering* (edited by A. Furrer), p. 87-108.

³ MANNIX D. *et al.*, Neutron and synchrotron diffraction study of UPtGe, *Phys. Rev.*, 2000, B 62, p. 3801-3810.

⁴ Je dois cette comparaison imagée à Alain Filhol.

aux enfants des collaborateurs allemands et anglais et d'autres nationalités la possibilité d'accéder à un enseignement qui ne les handicape pas à leur retour dans leur pays. Nous avons été conscients dès la création de l'ILL de l'importance de trouver une solution. Il est vraisemblable que l'absence d'un tel enseignement jouait un rôle dans la difficulté, mentionnée plus haut, de recruter des techniciens allemands (puis plus tard britanniques).

Une première réunion avec le recteur de l'académie de Grenoble se tint en juillet 1967. Il était évident depuis le début que seule la création d'une école internationale pouvait répondre aux besoins des familles non françaises tout en offrant aux familles françaises une option qui leur permettrait d'offrir à leurs enfants un enseignement ouvert sur l'Europe. À cette époque, le ministère de l'Éducation nationale n'était pas vraiment ouvert à l'idée d'école internationale.

Une école, celle dite de La Houille Blanche, fut choisie vers 1972 pour l'enseignement primaire ; des enseignants anglais et allemands payés par leur pays permettaient aux enfants de garder le contact avec leur langue et leur culture d'origine. Quant à l'enseignement secondaire, il fallut attendre vingt ans pour qu'une première solution soit trouvée et le lycée Stendhal fut choisi, à partir de 1987, pour que des classes internationales délivrent plusieurs heures d'enseignement dans la langue maternelle des enfants. Les enseignants en charge de ces cours supplémentaires, comme ceux de la Houille Blanche, furent d'abord rémunérés par le ministère de leur pays d'origine (pour les enseignants allemands, italiens et espagnols) ou par les instituts et la ville de Grenoble (pour les enseignants anglais), puis à partir de 1990 pris en charge, pour les professeurs d'anglais et d'allemand, par le rectorat.

Le succès de cette formule, l'appui de la mairie et l'accroissement de la demande, liés en partie à la mise en route de l'ESRF mais aussi à la venue d'ingénieurs non français dans les nouvelles industries en plein développement, conduisirent à la construction *de novo* d'une cité scolaire internationale, abritant un établissement public local d'enseignement (EPL). Cet établissement comprend une partie collège (565 élèves en 2004) et une partie lycée (470 élèves). Le mot partie est impropre car il n'y a aucune séparation physique entre elles. Comme dans tous les établissements publics, l'enseignement y est gratuit. Les élèves comportent 30 à 35 % d'étrangers. Il y a pour tous une sélection qui porte sur la connaissance d'une langue étrangère. L'enseignement des langues y est une priorité, faisant appel à 60 enseignants (sur un total de 150)

dont 30 français. Les élèves ont de ce fait huit heures de cours hebdomadaires de plus que ceux d'un lycée traditionnel. Les enseignants venant d'Angleterre ou d'Allemagne sont payés par l'éducation nationale française. Ceux des autres pays sont rétribués par leur pays. Tout cela suppose un énorme travail d'organisation (chaque élève a son propre emploi du temps) qu'assume le proviseur M. Ben Lahcen.

Pour le primaire, le système mis en place antérieurement à l'école de la Houille Blanche continue de fonctionner.

Évolution de l'ILL et ses problèmes

C'était bien d'avoir construit un institut avec son réacteur qui très rapidement prit une place de premier rang mondial et qui, par son succès, a pu en attirer d'autres. Mais il fallait être capable de maintenir cette position de leader mondial. Pour cela il fallait faire un effort continu pour améliorer sans cesse les instruments et en construire de nouveaux, si nécessaire. Mais il fallait aussi maintenir l'essentiel de l'organisation mise en place par Maier-Leibnitz, organisation qui avait prouvé son efficacité. Ce deuxième point n'était pas évident à réaliser. Depuis le départ de Maier-Leibnitz, douze directeurs se sont succédés (alternativement anglais ou allemands, avec une exception⁵ entre 1991 et 1994, période pendant laquelle le directeur fut un Français, Jean Charvolin) ainsi que vingt directeurs adjoints (un certain nombre de directeurs furent d'abord directeurs adjoints). En effet, avec l'arrivée des Britanniques, il y eut deux directeurs adjoints. Le tableau 7.1 fait l'inventaire de tous ces responsables successifs (voir aussi la figure 7.3). Le plus souvent, un nouveau directeur met en cause ce qu'a fait son prédécesseur. Mais en général, ce n'est pas ce qui se produisit à l'ILL. Ce qui fait l'originalité de l'ILL a été maintenu : les contrats de cinq ans des chercheurs (il y a encore, en 2004, 45 % des chercheurs qui travaillent avec de tels contrats), l'équilibre entre l'activité de service et la vie scientifique de l'ILL, l'organisation de cette vie au travers de collèges. Mon impression est que le personnel y est très attaché.

Il y a eut cependant une légère exception, à l'arrivée, en 1973, du premier directeur adjoint britannique, Mick Lomer. Ce dernier, un peu surpris et peut-être même un peu choqué par cette absence de structure hiérarchique dans la vie scientifique, imagina de créer une nouvelle structure. Sans toucher

⁵ Cette exception fut demandée par la partie française à cause de la reconstruction du réacteur qui se déroula pendant cette période.

Tableau 7.1. Directeurs et directeurs adjoints de l'ILL.

Nom	Nationalité	Fonction		En poste	Durée
		Directeurs	Directeurs adjoints		
Maier-Leibnitz	A	X		01/02/67-31/01/72	5 ans
Jacrot	F		X	01/02/67-30/09/73	6 ans, 8 mois
Mössbauer	A	X		01/03/72-28/02/77	5 ans
Lomer	B		X	01/05/73-31/10/74	1 an, 6 mois
Dreyfus	F		X	01/10/73-31/03/76	2 ans, 6 mois
White	B	X	X	01/04/75-28/02/77	1 an, 11 mois
				01/03/77-31/03/80	3 ans, 1 mois
Springer	A	X	X	01/03/77-31/03/80	3 ans, 1 mois
				01/04/80-30/09/82	2 ans, 6 mois
Joffrin	F		X	01/10/76-30/06/81	4 ans, 9 mois
Fender	B	X	X	01/04/80-30/09/82	2 ans, 6 mois
				01/10/82-31/03/85	2 ans, 6 mois
Winter	F		X	01/07/81-31/12/83	2 ans, 6 mois
Ruppersberg	A		X	01/10/82-31/03/85	2 ans, 6 mois
Michaudon	F		X	01/01/84-30/06/89	5 ans, 6 mois
Haensel	A	X		01/04/85-31/05/86	1 an, 2 mois
Enderby	B	X	X	01/08/85-31/08/88	3 ans, 1 mois
				01/06/86-31/07/86	(2 m. Dir. interim)
Gläser	A	X		01/08/86-30/09/89	3 ans, 2 mois
Day	B	X	X	01/10/88-30/09/89	1 an
				01/10/89-30/09/91	2 ans
Charvolin	F	X	X	01/07/89-30/09/91	2 ans, 3 mois
				01/10/91-30/10/94	3 ans, 1 mois
Armbruster	A		X	01/10/89-30/10/92	3 ans, 1 mois
Schofield	B		X	01/10/91-30/04/94	2 ans, 7 mois
Scherm	A	X	X	01/12/92-30/10/94	1 an, 11 mois
				01/11/94-31/12/97	3 ans, 1 mois
Leadbetter	B		X	01/05/94-31/07/99	5 ans, 3 mois
Leconte	F		X	01/11/94-31/08/99	4 ans, 10 mois
Dubbers	A	X	X	01/01/98-30/09/01	3 ans, 9 mois
				18/08/99-30/09/01	2 ans, 6 mois
Carlile	B	X	X	01/10/01-30/09/06	5 ans
Vettier	F		X	20/09/99-31/12/05	6 ans, 3 mois
Press	A		X	01/01/02-31/12/05	4 ans

 Allemand

 Français

 Britannique

aux collèges, il introduisit des groupes correspondants aux divers types d'instruments, par exemple les spectromètres à trois axes analogues aux groupes franchement techniques, tels ceux d'informatique. Il y avait une logique de rationalisation, en facilitant une coordination technique au niveau des instruments et de leurs équipements annexes. Ce qui a posé problème fut que la direction de l'Institut choisissait les responsables, dénommés coordinateurs, de ces groupes. Cela fut assez mal vécu et ces responsables nommés ne vinrent pas à la première

Figure 7.3. Photographie prise en septembre 2001 sur laquelle on voit une partie des directeurs et sous-directeurs successifs de l'ILL. Au premier rang, de gauche à droite : Scherm, Leadbetter, Dubbers, Enderby, Day, Jacrot, Armbruster. Au deuxième rang : Haensel, Carlile, Vettier, Fender, Joffrin Springer, Gläser.



réunion. Finalement tout s'apaisa. Les collègues demeurèrent un lieu privilégié de la vie proprement scientifique de l'ILL. Dans les rapports annuels, la partie qui leur est consacrée occupe plus de la moitié des pages.

La *modernisation des équipements* de l'ILL a eu deux composantes. La première fut une mise à jour permanente des appareils en service. Par exemple, le spectromètre à trois axes IN 3, pour lequel la demande était faible parce que les intensités étaient trop faibles, fut transformé en un spectromètre plus traditionnel. Un plus grand nombre d'expériences furent gérées individuellement par des PDP 11 (ou des Solar), au lieu de l'être collectivement par le système Carine. Il serait fastidieux d'énumérer toutes ces modifications faites en permanence en utilisant le budget normal de fonctionnement.

La deuxième composante de la mise à jour fut la mise en route d'un programme de modernisation décidé par les associés et financé en dehors du budget annuel de l'ILL. Le premier programme de ce type, évoqué en 1977, fut décidé en 1978 avec un budget initialement prévu de 82 millions de francs, qui finalement, avec l'érosion du pouvoir d'achat dû à l'inflation, fut de 104 millions de francs pour la période 1979-1985. Dénommé *deuxième souffle*, ce programme fut initié par Jules Horowitz qui sut convaincre les associés de le financer. L'arrivée des Britanniques avait considérablement augmenté la demande sur les divers instruments. Il était donc nécessaire d'en construire de nouveaux et d'optimiser encore plus ceux existants. Les choix furent faits en consultation avec le conseil scientifique qui finalisa ses recommandations lors de sa réunion du 18 mars 1978. Dans ce cadre, fut mis en place

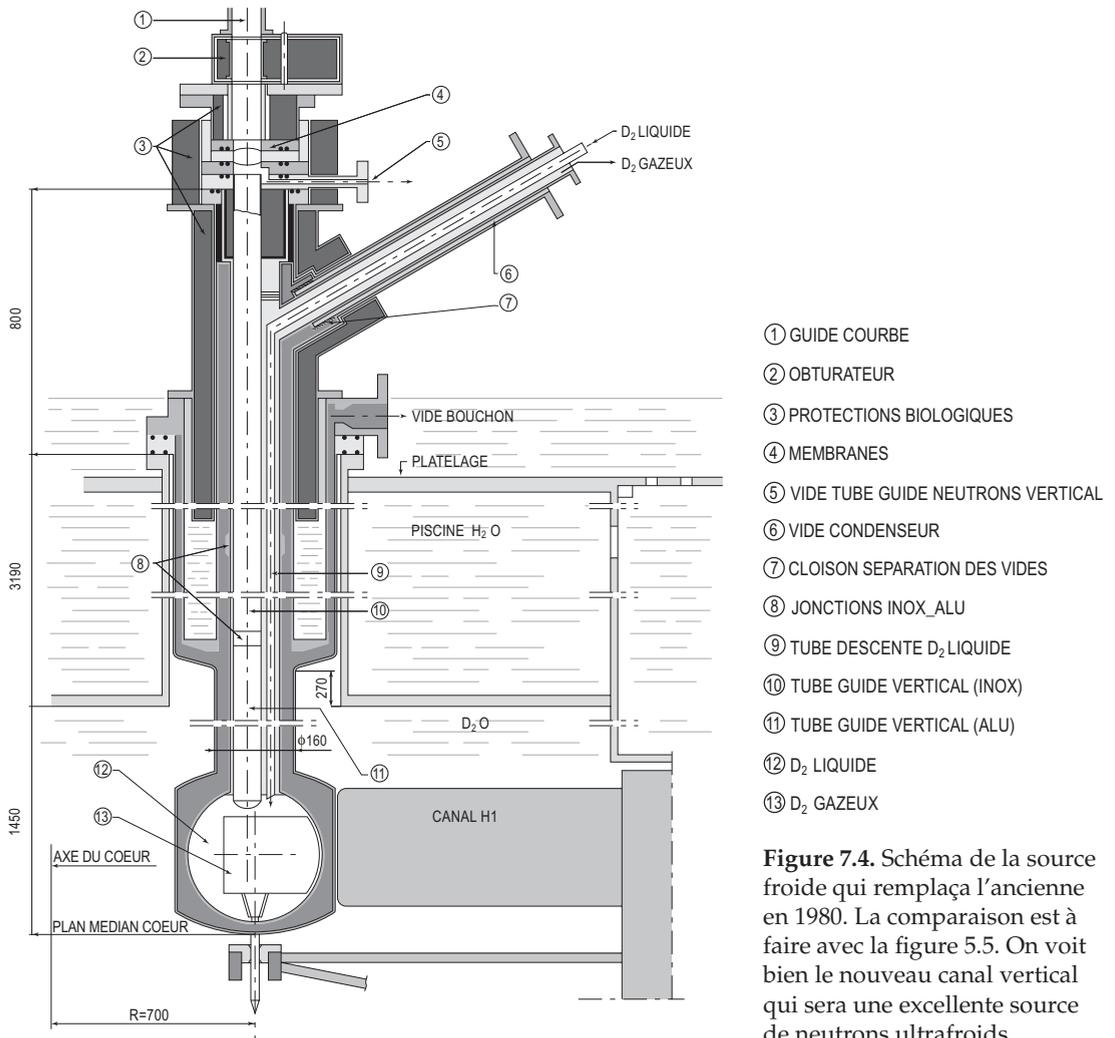


Figure 7.4. Schéma de la source froide qui remplaça l'ancienne en 1980. La comparaison est à faire avec la figure 5.5. On voit bien le nouveau canal vertical qui sera une excellente source de neutrons ultrafroids.

un nouveau calculateur central DEC 1091 et Carine totalement remplacé par des mini-calculateurs individuels sur chaque expérience.

Mais plus important fut le remplacement de la source froide par une nouvelle dont la conception⁶ a conduit à un accroissement du flux par un facteur d'environ 1,6 (fig. 7.4).

⁶ Cette nouvelle conception, due à Paul Ageron, consistait à introduire à l'intérieur de la sphère contenant le deutérium liquide une cavité remplie de deutérium gazeux. Ceci permettait de conserver la grande dimension de la source nécessaire pour alimenter le faisceau de guide. Les calculs prédisaient un accroissement du flux de neutrons froids, ce que l'expérience a confirmé.

Il a aussi été possible d'y ajouter un canal vertical, débouchant au niveau de la zone de commande du réacteur, créant à cet endroit une nouvelle aire expérimentale. Ce canal vertical a permis d'améliorer considérablement la source de neutrons ultrafroids. Ensuite en décembre 1981, le comité de direction a donné son accord pour la construction d'une seconde source froide. Installée dans un canal horizontal, elle était prévue pour être équipée de trois guides de neutrons débouchant dans un second hall adjacent au bâtiment du réacteur. Cette nouvelle source fut mise en place en 1987. À cette occasion, le canal qui la contient a été remplacé par un nouveau en zircalloy, matériau ayant, sous rayonnement, un temps de vie plus long.

Ce « second souffle » a également permis la construction de quatre nouveaux instruments décidés en collaboration avec le conseil scientifique. Par exemple, le spectromètre à trois axes IN 2 a été remplacé par un nouveau nommé IN 20 de meilleures performances et permettant d'utiliser des neutrons polarisés.

Un investissement a été aussi fait pour les bâtiments : un nouveau local a été construit pour le nouveau ordinateur. La biologie de l'ILL a été regroupée avec celle de l'EMBL dans un nouveau bâtiment.

Pour la première fois, on a réalisé, en avril 1981, un échange de doigt de gant. Ceci a été fait sur l'un des canaux de la source chaude car une petite fissure avait été détectée. Pour éviter les éventuelles conséquences de telles fissures, les canaux jusqu'alors maintenus sous vide, furent remplis d'hélium sous pression ce qui réduisait les contraintes auxquelles étaient soumis les doigts de gants. L'opération s'est déroulée de façon très satisfaisante, permettant d'envisager de généraliser de tels échanges, qui peuvent être réalisés pendant un arrêt normal (de l'ordre de dix jours entre les cycles). L'étude du doigt de gant retiré a permis de connaître la tenue de l'aluminium dans les conditions d'irradiation du réacteur. D'autres échanges de doigts de gants pendant un arrêt normal du réacteur eurent lieu les années suivantes (un en 1982 et quatre en 1983).

Pendant un arrêt de beaucoup plus longue durée, onze mois, fut programmé entre octobre 1984 et août 1985 pour regrouper des interventions plus complexes, comme le remplacement du canal H1-H2, rendu nécessaire par le vieillissement de sa structure dont partent les deux groupes (thermique et froid) de guides de neutrons. À cette occasion, l'alliage d'aluminium a été remplacé par du zircalloy, matériau ayant sous rayonnement un temps de vie plus long. Mais déjà

à cette époque, les prélèvements de matériaux irradiés effectués sur les différents doigts de gans retirés du réacteur avaient permis de vérifier la dynamique d'évolution du matériau sous flux. Ils faisaient apparaître que les modifications de l'aluminium conduisaient à prévoir le remplacement du bloc pile, opération que les constructeurs du réacteur avait rendue possible à la conception du projet. Une note à ce sujet fut rédigée par Franzetti, alors chef du service réacteur. C'est également durant ce long arrêt qu'eut lieu le remplacement, mentionné plus haut, de la source froide verticale.

Au début de 1990, on s'est aperçu que depuis l'origine la puissance réelle du réacteur était supérieure au 58 MW, de près de 10 %. Cela fut suggéré par un temps de vie de l'élément combustible plus court que celui prévu par les calculs. Cette erreur était due à un étalonnage du débitmètre en eau légère, sans que soient ensuite faites les corrections pour tenir compte de son fonctionnement avec de l'eau lourde. De plus, les différences de pressions furent faites à l'aide d'une colonne de mercure, en ne tenant pas compte de la différence de densité entre eau légère et eau lourde. Pour retrouver la puissance nominale qui avait été annoncée aux commissions de sûreté, il a donc fallu baisser la puissance (et donc le flux de neutrons). De ce fait, la durée des cycles a pu être prolongée de 44 à 50 jours. La découverte de cette surpuissance du réacteur a permis de comprendre l'origine d'un fait troublant : durant les premières années, le combustible usé était renvoyé aux États-Unis pour être retraité. Dans le bilan des Américains, la quantité restante d'uranium 235 non brûlé était de 10 % plus faible que celle à laquelle on s'attendait, ce qui fut confirmé quand le retraitement fut effectué en France⁷.

⁷ Je remercie Michel Jacquemain pour ces informations.

Chapitre 8

Années noires (1991-1995)

Reconstruction du réacteur

Une fissure d'un élément du bloc pile fut observée en avril 1991, nécessitant son remplacement. Cette intervention entraîna un très long arrêt du réacteur qui ne put redémarrer que le 6 janvier 1995. Je reprends ici une description des événements de 1991, rédigée par Jean Charvolin dans le rapport annuel pour 1991.

« Le 30 mars, alors que le réacteur est arrêté après un cycle de fonctionnement normal, une inspection de routine détecte des traces inhabituelles sur une grille de tranquillisation de l'écoulement d'eau lourde à l'intérieur du bidon réflecteur. Le 5 avril, après une analyse approfondie, il apparaît que ces traces correspondent à des fissures traversantes dans la grille qui doit donc être changée. Un tel changement implique une grande intervention dans le bidon réflecteur, elle-même précédée d'une longue préparation. L'Institut espère alors pouvoir renforcer la grille pour permettre un redémarrage temporaire pendant la période de préparation mais, la poursuite des investigations ayant permis de bien comprendre l'origine des dommages, il renonce à cet espoir devant l'ampleur des travaux de renforcement et décide le 10 juillet de maintenir le réacteur à l'arrêt pour attaquer immédiatement la réflexion sur la grande intervention. Les options techniques possibles, ainsi qu'une première évaluation de leurs coûts et durées, sont proposées fin septembre aux associés qui demandent alors à l'Institut de préparer une analyse détaillée de l'option avec changement complet du bidon réflecteur et de ses structures internes pour fin janvier 1992, afin de leur fournir tous les éléments nécessaires à leur prise de décision. Le coût et la durée de cette option avaient été estimés pendant l'été à 150 millions de francs et 28 mois respectivement et le travail en cours devra asseoir ces estimations sur la base solide d'engagements industriels.

Depuis le 30 mars (1992) les équipes de la Division Réacteur sont engagées dans un travail d'analyse et de proposition remarquable de rigueur et d'efficacité, elles doivent être remerciées au nom de tout l'Institut.

Financement de la remise en état du réacteur

Comme déjà dit plus haut ce financement doit être assuré.

À partir d'une réserve adéquate constituée sur les budgets des années 1991 (313 millions de francs)¹, 1992 et 1993 (310 millions de francs). En 1991, en raison de la date tardive de la décision définitive de maintenir le réacteur à l'arrêt il ne fut pas possible de contribuer à cette réserve de façon importante et la majorité des économies va être réalisée en 1992-1993. Une partie de la somme a été évidemment trouvée dans les conséquences immédiates de l'arrêt du réacteur : combustible, électricité, fluides cryogéniques des expériences, financement des visiteurs, arrêt du recrutement de scientifiques. Mais ceci n'a pas été suffisant et il a été nécessaire de reconsidérer le calendrier du plan de développement de l'Institut, de favoriser le départ de personnels proches de la retraite, d'encourager les détachements vers d'autres laboratoires, et de bloquer les recrutements sur les postes libérés. L'application de ces mesures dès la fin 1991 permet d'envisager d'assurer la moitié de la réserve en 1992. Un travail semblable devra être poursuivi en 1992 pour apporter le complément nécessaire en 1993. Enfin, si le raffinement de l'évaluation des coûts attendu pour fin janvier 1992 entraînait une révision à la baisse de ces derniers, la partie de la réserve non utilisée par le réacteur pourrait être reversée dans le programme instrumental avec l'accord des associés. »

[...]

« Le réacteur, cœur de l'Institut, est arrêté depuis le 30 mars et ne sera pas remis en fonctionnement avant 1994. Cet événement a non seulement interrompu certains aspects de l'activité scientifique de l'Institut, mais aussi lui impose de reconsidérer ses plans à moyen terme : développement instrumental, distribution du personnel, relations avec les communautés scientifiques des utilisateurs et les autres centres. Si la fonction de l'Institut était de développer un parc instrumental et une vie scientifique propres à garantir l'accueil le plus efficace possible des utilisateurs, il doit maintenant assurer la remise en état la plus rapide possible de son réacteur, c'est-à-dire la mise en place et le bon déroulement d'un important et coûteux projet d'ingénierie nucléaire, tout en préservant ses potentiels instrumental et scientifique. Ce changement brutal d'orientation doit de plus être assuré dans un contexte assez difficile du fait de contraintes budgétaires et de la renégociation envisagée de la Convention Intergouvernementale régissant l'Institut. »

¹ Les sommes entre parenthèses sont les budgets annuels.

Il s'agissait vraiment d'une reconstruction du réacteur. Pour cela un petit groupe projet fut mis sur pied dont la responsabilité fut, à l'initiative de Dautray, confiée à Jean-Paul Martin, qui fit venir quatre ingénieurs du CEA qu'il connaissait bien. Cet excellent ingénieur avait eu, comme je l'ai dit plus haut, un très grand rôle dans la construction d'un réacteur qu'il connaissait mieux que quiconque. De plus, il avait, au cours des dernières années, acquis, à l'usine de retraitement de La Hague, une grande expérience dans le découpage des matériaux radioactifs. Or cela constituait la partie la plus difficile de la réhabilitation du réacteur. Jean-Paul Martin proposa une solution pour la réaliser. Un architecte industriel (Technicatom) fut aussi choisi. Mais c'est l'ILL qui avait la responsabilité des travaux et qui la délégua à Ekkehardt Bauer, alors chef de la division réacteur. L'essentiel du travail fut réalisé par les techniciens et ingénieurs de l'ILL. Toute l'équipe y participa, mais aussi d'autres personnes appartenant aux services scientifiques (vingt-quatre membres du personnel furent ainsi transférés temporairement des autres services à la division réacteur). Ce sont eux qui sortirent l'ancien bidon qui contenait l'eau lourde et le découpèrent pour pouvoir stocker ce matériau radioactif. Ils mirent en place le nouveau bidon construit par la firme allemande Zeppelin.

Le réacteur ne put redémarrer que le 6 janvier 1995. À cette occasion, d'autres interventions relativement mineures furent effectuées, telles que la suppression du canal bêta. En dehors de la perte considérable de temps de réacteur, cette opération fut coûteuse. L'ILL a dû dépenser en commandes et en sous-traitance 23 millions d'euros (pour un budget prévisionnel de 173,1 millions de francs soit 26,3 millions d'euros). La contribution du personnel de l'Institut, sans laquelle cette dépense eut été beaucoup plus élevée, est estimée à 18 millions d'euros. Cette prise en charge de la reconstruction du réacteur sur le budget de l'Institut a imposé à ce dernier un plan très rigoureux d'économie, avec par exemple la suppression de la voiture de service de l'ILL et de son chauffeur. Ce plan a dû être d'autant plus rigoureux que la réduction annoncée (dont je parle plus loin) de la participation britannique imposait de prélever les sommes nécessaires sur les seuls budgets 1992 et 1993. Une réduction importante des frais de personnel fut indispensable. Les effectifs passèrent de 483 en 1991 à 469 en 1992 puis à 420 en 1993, pour finir à 377 en 1994. Pour arriver à ce résultat, il a été fait appel aux préretraites (à partir de 55 ans) dans le cadre du « Fonds national de l'emploi » (FNE). Cela se passait à une époque où la politique du gouvernement

français encourageait de tels départs. Ces mesures, prises en concertation avec les représentants du personnel, furent imposées à tous ceux qui répondaient aux critères d'âge. Ces départs furent le plus souvent bien acceptés par les intéressés, car les conditions en étaient bonnes. Certains physiciens vécurent assez mal le fait d'être écartés d'un travail qui était leur principale raison de vivre. Heureusement, il y eut quelques rares exceptions (une ou deux) qui ont résulté d'une demande, pour raisons de service, de la direction faite parfois sous la pression des chercheurs qui tenaient à conserver un collègue². De plus les nouveaux recrutements (quant il y en eut, 13 en 1992 et 7 en 1993) faisaient entrer à l'ILL des gens plus jeunes (donc avec des idées nouvelles et aussi moins coûteux) que ceux qui partaient. D'autres mesures, telles que le travail à mi-temps, le détachement auprès d'autres instituts furent aussi mises en place (qui permirent d'économiser 7,8 millions de francs en 1993). Certaines compétences techniques, en particulier en électronique, furent perdues par l'ILL et furent longues à être acquises de nouveau. Bien entendu les restrictions budgétaires empêchèrent aussi de réaliser les modifications souhaitables sur les instruments. Elles rendirent le redémarrage difficile par manque de personnel. Mais l'essentiel fut atteint : la reconstruction fut un succès et le fut strictement dans le cadre de l'enveloppe budgétaire prévue.

On peut *a posteriori* se poser des questions sur la longueur de l'arrêt du réacteur. C'est en avril 1991 que les fissures sont observées. Ce n'est qu'en novembre de la même année que le comité de direction demande une étude comparative des diverses options pour résoudre le problème posé et le remplacement du bloc pile est décidé en février 1992. En juillet 1994, l'assemblage était terminé et le réacteur déclaré techniquement prêt. L'enquête publique nécessaire pour le redémarrage avait débuté en mai, mais ce n'est que le 6 décembre que le décret fut signé. Dans sa réunion du 25 novembre 1993, le comité de direction mentionnait les lenteurs des procédures administratives et exprimait son inquiétude au sujet des conséquences sur le planning. Tout cela laisse certains physiciens penser que l'arrêt aurait peut-être pu durer une année de moins (j'en ai eu des échos auprès de certains physiciens de l'ILL).

En réalité, les choses ne sont pas si simples. L'idée même de reconstruction n'était pas évidente pour les associés. L'arrêt

² C'est ainsi que Jane Brown, une éminente cristallographe anglaise, a pu rester. Elle est toujours présente à l'ILL.

du réacteur, alors que les associés étaient engagés entre autres dans la construction de l'ESRF, eut un effet déstabilisant. Le consensus dont bénéficiait l'ILL en fut bien affecté. En Grande-Bretagne, certains (mais pas tous) espéraient une fermeture de l'ILL, qui aurait comme conséquence de faire d'ISIS (la source à spallation britannique en construction) la seule source à haut flux en Europe. Les Allemands étaient échaudés par les dépassements de budget des travaux faits à Jülich et Berlin. Les moyens des associés français étaient limités et ils hésitèrent un certain temps avant de soutenir la reconstruction qui était réclamée avec insistance par la direction. Finalement cette demande ne fut acceptée par l'ensemble des associés que lorsque la direction de l'ILL s'engagea à la réaliser dans le cadre de son budget annuel sans demander rien d'autre que le maintien de ce budget ; ce qu'il a réussi à faire. Un sous-comité fut créé par le comité directeur pour suivre de très près la reconstruction. On peut alors comprendre que cette réflexion et les études indispensables aient nécessité beaucoup de temps. En ce qui concerne le redémarrage, il faut se souvenir que les choses avaient bien changé depuis 1971, époque à laquelle le nucléaire bénéficiait en France d'un soutien total de l'opinion publique. Depuis il y a eu l'accident tragique de Tchernobyl, qui a beaucoup marqué les esprits. Dans les années 1990, il existait une pression écologiste et une réticence d'une partie de l'opinion publique au nucléaire. Les autorités de sûreté (qui avaient déjà exigé que le directeur de l'Institut soit français durant cette période de reconstruction) tenaient à ce que le décret autorisant le redémarrage soit bien mûri, ce qui prend nécessairement du temps. La sûreté passe certainement avant la satisfaction des physiciens pressés de reprendre leurs travaux.

Désengagement partiel des Britanniques et ses conséquences

Cette grande panne du réacteur eut une grave conséquence, la demande en 1991 par la Grande-Bretagne de renégocier la convention intergouvernementale, en vue de réduire sa participation financière. Alors que l'on pouvait espérer que la lettre et l'esprit de la convention intergouvernementale seraient toujours respectés pour le meilleur comme pour le pire, survint Madame Thatcher qui, dans sa politique générale de réduction des dépenses publiques, réduisit le budget alloué au SRC. Confrontés à une situation difficile (qui perdura après le

départ de Mme Thatcher en 1990), les responsables du SRC (devenu le SERC) étudièrent de près toutes leurs dépenses et arrivèrent à la conclusion que la Grande-Bretagne dépensait trop d'argent pour les neutrons. L'essentiel de ces dépenses, 22 millions de livres, consistait, à parts à peu près égales, en la participation à l'ILL et à la construction en Grande-Bretagne d'ISIS, une source à spallation. Un comité présidé par Mick Lomer fut chargé de faire des propositions en vue de réduire d'environ 5 millions de livres ces dépenses. Leurs conclusions furent les suivantes : réduire le financement d'ISIS conduirait à la mort du projet et ils firent donc la proposition de réduire la participation à l'ILL de 33 à 25 %. Cette proposition fut d'abord exposée lors d'une conférence de presse, puis présentée à la réunion du comité de direction qui se tint à Grenoble le 28 novembre 1991. Cette annonce d'un retrait partiel des Britanniques fut très mal reçue par le personnel et la direction de l'ILL. Elle venait à un très mauvais moment, celui où le réacteur était à l'arrêt et où les associés se demandaient s'il fallait procéder à sa reconstruction. Dans la conférence de presse, de même que dans son intervention³ au comité directeur, le représentant du SERC, Dr R. Newport insiste beaucoup sur le fait que cette décision n'était pas connectée aux problèmes du réacteur ; ce qui est un peu difficile à croire. Cela n'empêcha pas l'établissement de bons rapports entre Newport et la direction de l'ILL.

Le résultat pratique fut que la contribution britannique passa de 100 millions de francs en 1993 à 66 millions de francs en 1994. L'importante diminution du budget qui en résulta ne fut que très faiblement compensée par une légère augmentation de la contribution des pays scientifiquement associés (accueillis pour des raisons strictement scientifiques et non pour des motifs d'ordre budgétaire) qui contribua en 2001 à 14,2 % du budget annuel de fonctionnement. Il a donc fallu faire des économies. Deux méthodes ont été utilisées dans ce but. Les restrictions de personnel résultant des frais pour la reconstruction du réacteur furent maintenues. L'autre façon de faire des économies fut la mise en route du *Collaborative Research Group* (CRG). Il s'agit de la construction d'équipements réalisée en commun, à frais partagés, entre l'ILL et un laboratoire extérieur. Le principe en avait été suggéré dès les débuts de l'ILL, mais aucune concrétisation n'avait suivi.

³ Le texte original de cette intervention est reproduit en annexe 6.

Il y a trois modèles de CRG :

- *les CRG de type A* : ils sont construits par l'ILL et demeurent sa propriété ; 50 % du temps est réservé pour l'ILL.

- *les CRG de type B* : ce sont des instruments d'intérêt général construits et payés par un groupe extérieur. 30 % du temps est réservé pour l'ILL. Certains d'entre eux sont des instruments de l'ILL achetés par l'un de ces groupes. Ce fut par exemple le cas du spectromètre à trois axes IN 12 acquis par le centre de recherche de Jülich.

- *les CRG de type C* : il s'agit d'expériences plus que d'instruments. Un seul groupe extérieur est intéressé à sa construction et à son fonctionnement ; il y a peu d'interaction avec l'ILL, sauf dans le domaine de la sécurité. Un exemple est l'interféromètre construit par l'université de Vienne (Autriche) avec lequel ont été réalisées des expériences dont je parlerai dans le chapitre consacré au bilan de l'ILL.

La mise en place de ce dispositif nouveau a permis de réduire à vingt-cinq le nombre des instruments purement ILL. Corrélativement onze CRG ont été mis en place, dont neuf sur lesquels l'ILL dispose d'une partie du temps. Les premiers contrats de ce type ont été fait avec l'Institut Paul Scherrer (Suisse) en 1994 pour une utilisation partielle du diffractomètre à poudre à haute résolution D1A et pour un spectromètre à trois axes. La mise en place de ces CRG eut, outre son intérêt financier, l'avantage de permettre de faire fonctionner l'ILL avec le personnel trop peu nombreux restant après tous les départs anticipés à la retraite.

J'ai déjà mentionné l'accueil très négatif du retrait partiel des Britanniques. Cela mit les directeurs adjoints britanniques dans une position difficile. Il n'y a pas eu de directeur britannique entre le départ de Peter Day en 1991 et l'arrivée de Colin Carlile en 2001 (après une période durant laquelle il fut directeur adjoint). Ce retour d'un directeur anglais a été rendu possible par une augmentation progressive (27 % en 2000, 29 % en 2001, 32 % en 2002) de la participation britannique revenue à 33 % en 2003. Ce retour a été salué par tous à l'ILL.

Approvisionnement en uranium enrichi

Un autre problème se posa à la même période pour le réacteur⁴. En 1992, les conditions d'exportation de l'uranium très enrichi par les États-Unis furent modifiées par l'amendement Schumer. Cet amendement stipulait que l'uranium hautement enrichi (qui rappelons-nous est directement utilisable pour faire une bombe atomique) ne pouvait être exporté pour son utilisation dans un réacteur de recherche que si un uranium faiblement enrichi (de l'ordre de 20 %) ne permettait pas le fonctionnement du réacteur. L'acheteur doit s'engager à passer à ce dernier dès que possible. Dans le cas du réacteur de l'ILL, l'utilisation de cet uranium faiblement enrichi serait très difficile sinon impossible. La direction de l'ILL ne souhaitant pas passer sous les fourches caudines des États-Unis, s'est orienté vers le marché russe rendu accessible à la suite de l'effondrement de l'URSS.

À ce stade les responsables du CEA, qui avaient aussi à assurer l'approvisionnement en combustible du réacteur de recherche, Orphée, de Saclay, se chargèrent des négociations. Un contrat rédigé en 1993-1994, fut finalement signé le 19 avril 1996. Il prévoyait trois livraisons successives de 165 kg, devant avoir lieu à trois ans d'intervalle, couvrant les besoins de l'ILL pour neuf années. La livraison étant sans cesse retardée, à la fin de 1997, les responsables retournèrent vers les États-Unis. Cela impliquait de se conformer à l'amendement Schumer, c'est-à-dire de s'engager à modifier le réacteur, s'il s'avérait possible d'atteindre les mêmes performances avec de l'uranium faiblement enrichi. Un mémorandum fut donc signé fin 1998 entre le département d'État des États-Unis et l'ILL (ceci bien entendu avec l'autorisation des trois gouvernements concernés). Les Russes, avec lesquels le contact avait été maintenu, livrèrent alors 227 kg d'uranium (dont 165 kg pour l'ILL) deux mois après la signature du mémorandum avec les États-Unis. Les livraisons suivantes prévues au contrat eurent lieu normalement. Il peut être utile, pour bien comprendre ces tergiversations, de se rappeler qu'à cette époque, la Russie et les États-Unis étaient en pleine négociation pour mettre au point des mesures concrètes pour limiter les risques de dissémination des armes nucléaires⁵.

⁴ Je remercie Philippe Leconte pour les renseignements qui m'ont permis de rédiger ce qui suit.

⁵ On trouve une analyse de ces négociations dans le livre *De Tchernobyl en Tchernobyls* de Charpak G., Garwin R.L. et Journé V., 2005, Odile Jacob.

Chapitre 9

Consolidation et avenir

Millenium

Pendant la période 1991-1994, il y eut peu ou même pas de modernisation des instruments. Heureusement, après cette période très difficile pour l'ILL, en 2000, à l'occasion du nouveau millénaire, fut lancé par Dubbers, alors directeur de l'ILL, le 1^{er} janvier 2000, avec un budget annuel de 3 millions d'euros, le programme baptisé « Millenium », destiné essentiellement à assurer le renouvellement et la mise à jour du parc d'instruments. Ce budget provient en partie de celui de l'ILL (qui fit par ailleurs des économies), en partie des associés et enfin de financements extérieurs, en particulier de l'Europe. La participation britannique a consisté au financement direct de certains équipements. Dans ce contexte, neuf instruments ont été reconstruits ou sont nouveaux. Par exemple, la totalité des choppers de IN 5 ont été remplacés par de nouveaux qui, en dehors du fait qu'ils sont neufs (un point important pour des machines tournantes de haute performance), permettent d'utiliser un faisceau de plus grande dimension.

La sécurité du réacteur est évidemment un point de première importance. Les normes en matière de construction antisismique ont été durcies depuis la construction. Le réacteur doit aussi être protégé contre les attentats. Pour prendre en compte cet aspect, des travaux ont dû être envisagés, en particulier sur la liaison du bâtiment abritant le réacteur avec les constructions adjacentes (bâtiment des physiciens, halls des guides). Le coût des travaux, estimés à 20 millions d'euros, est pour 9 millions d'euros l'objet d'une contribution extraordinaire des associés ; le reste est pris sur le budget normal de fonctionnement de l'ILL. Cela a obligé l'Institut, pour faire des économies, à réduire le nombre annuel de cycles du réacteur à 3 (150 jours), au lieu de 4 à 5.

La maturité de l'Institut a entraîné quelques modifications de son statut. L'une d'elles est qu'aux trois associés sont venus se joindre plusieurs pays avec un statut de partenaire scientifique associé qui leur assure un accès aux instruments. Il s'agit

de l'Espagne avec une participation de 4 %, de la Suisse avec 3 %, de la Russie pour 2,2 % et d'un consortium d'Europe centrale (regroupant l'Autriche et la Tchéquie) pour 2 % et de l'Italie. Globalement, environ 15 % du budget de fonctionnement de l'ILL. Ces pays ont chacun un représentant au comité de direction ainsi qu'au conseil scientifique.

En janvier 1996, le Forschungszeuntrum de Jülich remplace le GFK de Karlsruhe en tant qu'associé allemand à l'ILL, comme il l'était déjà à l'ESRF. La principale raison était qu'à ce moment là l'activité neutronique s'était beaucoup développée à Jülich, alors qu'elle avait plutôt diminué à Karlsruhe. Ceci permettait aussi d'avoir le même associé allemand dans les deux instituts voisins que sont l'ESRF et l'ILL.

Réorganisation de l'ILL

En 1992, il fut demandé par le comité de direction à la direction de l'ILL de mettre en place l'organisation suivante : création de deux divisions, une division scientifique et une division des projets et des techniques. Ces deux divisions sont chacune sous la responsabilité de l'un des directeurs adjoints et elles viennent compléter les deux divisions existantes, celle du réacteur et celle de l'administration. Cette nouvelle structure fut mise en place à partir de juillet 1993. Cette nouvelle organisation a le grand avantage de bien définir le rôle des directeurs adjoints. Il y avait une tendance certaine à ce qu'ils se considèrent comme les représentants de la communauté scientifique de leurs pays. Cette tendance n'existait pas beaucoup dans l'institut franco-allemand d'origine. Elle se développa quand il y eut trois pays. La nouvelle organisation a le mérite de supprimer cette tendance en confiant à chaque directeur adjoint une responsabilité supranationale. Mais elle comporte, me semble-t-il, un grand danger : en créant une structure hiérarchique dans le domaine scientifique, elle risque de mettre à mal ce qui, comme je l'ai dit plus haut, fut et reste toujours une originalité féconde de l'ILL, l'organisation des collègues. Les personnalités qui ont à ce jour exercé ces responsabilités ont permis de maintenir cette originalité ; mais le risque demeure si venaient des directeurs adjoints autoritaires.

Quelques chiffres

Le personnel de l'Institut a tout naturellement crû pendant la phase de construction (voir fig. 9.1), mais après cette phase il

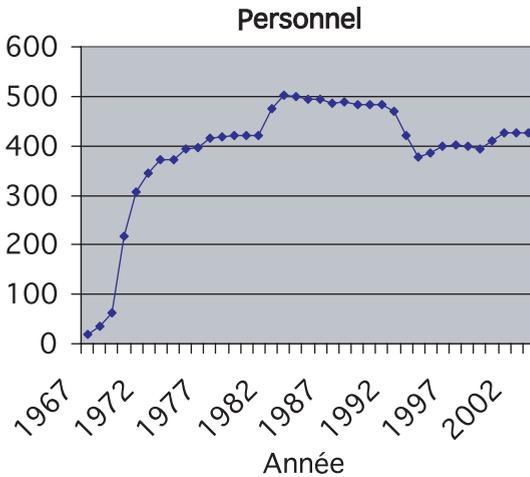


Figure 9.1. Évolution des effectifs globaux de l'ILL depuis sa création (1967).

est resté remarquablement stable à long terme avec un effectif total de 422 en 1980 et de 427 en 2003.

Mais si on regarde de plus près, on s'aperçoit qu'il y a eu une période de forte croissance entre 1981 et 1983. Cela résultait de l'application à l'ILL d'une nouvelle loi française imposant à toute entreprise de recruter le personnel qui y travaille à temps plein avec un statut de régie. Il s'agissait entre autres du personnel de gardiennage ou de celui qui effectue le nettoyage. Cela a conduit en 1982 au recrutement de 35 personnes, puis en 1983 de 23 autres, portant l'effectif total à 502 employés dont 105 chercheurs et 223 techniciens. Cette opération a eu un coût important. Dans le budget de 1982 l'embauche de 30 agents est estimée à 1,95 million de francs, dépense compensée partiellement par la réduction du chapitre des dépenses de services extérieurs, laissant une somme de près de 0,6 million de francs à prendre sur le budget d'investissement de l'ILL, c'est-à-dire sur le développement des instruments.

Comme je l'ai dit plus haut, les problèmes posés par la reconstruction du réacteur et le désengagement partiel des Britanniques imposèrent de ramener l'effectif total à un nombre à peu près égal à celui de 1981, soit aux environs de 420-427, mais avec un nombre de chercheurs (hors thésards) passé de 72 en 1981 à 56 en 2003.

Pour la réalisation des travaux du second souffle, douze personnes furent provisoirement détachées par les associés. Cette stabilité des effectifs sur une période de plus de vingt ans me paraît remarquable. Elle a tout naturellement entraîné une relative stabilité du budget (en dehors de la pé-

riode de retrait partiel des Britanniques) qui n'a pas augmenté beaucoup plus que l'inflation. En 1980 le budget (hors second souffle) était de 137,6 millions de francs; en 2002 il fut de 60 millions d'euros, ce qui correspond d'après les données de l'INSEE à 174 millions de francs de 1980; cela indique que le budget n'a crû, en moyenne, en francs constants que d'environ 1 % par an.

La convention intergouvernementale d'origine créant l'ILL était conclue pour une durée de treize ans et il était prévu qu'elle soit prorogée d'année en année par tacite reconduction. En fait elle a été prolongée plusieurs fois; la dernière fois, en 2002, l'accord a été étendu jusqu'à la fin de 2013, c'est-à-dire 46 ans après la création.

Conclusion

Ce bilan doit prendre en compte les deux aspects qui furent soulignés lors de la création de l'ILL et qui justifiaient cette création : une collaboration franco-allemande pour concrétiser les accords Adenauer-de Gaulle et une collaboration scientifique.

Coopération franco-allemande

Comme je l'ai mentionné dans l'introduction, cette collaboration n'allait pas de soi. En 1965, la dernière guerre était encore proche. Il y avait toujours dans l'opinion publique française une méfiance vis-à-vis de l'Allemagne. On continuait encore à utiliser l'expression péjorative « les boches » pour parler des Allemands. Ceci était particulièrement vrai à Grenoble où le souvenir du maquis du Vercors et de sa fin tragique était très présent. Par ailleurs la venue des chercheurs allemands dans l'utilisation des faisceaux de neutrons était très récente et leurs contributions le plus souvent ignorées par leurs collègues français. Cette collaboration n'était pas toujours bien vue en France. Il est remarquable que, parmi les premiers acteurs de la création de l'ILL, deux des Français, Jules Horowitz et Robert Dautray, tous deux d'origine juive, avaient eu particulièrement à souffrir du nazisme. Le père de Dautray et la mère d'Horowitz sont morts assassinés à Auschwitz. Tous deux n'ont échappé que de très peu à la déportation. Mais, ils ont toujours refusé de confondre le nazisme avec l'Allemagne, dont ils connaissaient et appréciaient la culture, et tous les deux travaillèrent après la guerre au développement de la coopération franco-allemande. Cette attitude contrastait avec celle qui avait prévalu en France après les guerres de 1870 et de 14-18. Alors l'idée de revanche et de vengeance dominait. Pour Dautray et Horowitz, la culture allemande, qu'ils connaissaient bien, était incompatible avec le nazisme. Cette attitude, qui fut aussi celle du général de Gaulle, scellant avec Konrad Adenauer le rapprochement entre la France et l'Allemagne, a certainement été pour beaucoup dans la solidarité et même l'amitié existant maintenant entre les deux pays. L'opinion publique française, y compris celle des scientifiques, demeurait cependant souvent méfiante. Le rôle de Maier-Leibnitz et de son épouse fut déterminant pour dissiper cette méfiance. Son charisme y contribua. Je me souviens d'une réunion lors des débuts de l'ILL qui s'est tenue à Saint Nizier dans un hôtel qui avait été complètement rasé lors de la liquidation par l'armée allemande des maquis du Vercors. La propriétaire était *a priori* réticente à nous accueillir. Après avoir vu Maier-Leibnitz, ses réticences se sont dissipées et nous eumes de nombreuses réunions dans cet hôtel (qui préparait un excellent gratin dauphinois). Les rapports entre Maier-Leibnitz et Dautray étaient franchement amicaux. Ce fut aussi le cas pour les miens.

Je n'ai pratiquement jamais eu de conversations avec Maier-Leibnitz sur la guerre et la période qui la précéda. C'était comme si sa vie scientifique avait commencé à Munich. Je n'ai appris des faits sur cette période difficile qu'en lisant son livre de souvenir *Ein halbes Jahrhundert Experimentelle Physics*. Et dans ce livre, moins de soixante pages sont consacrées à cette période prémunichoise (1929-1952) sur un volume de 300 pages. Je pense que cette discrétion était une manifestation de pudeur.

Les premiers chercheurs allemands qui arrivèrent à l'Institut appartenaient tous à la génération pour laquelle cette période, qu'ils n'avaient pas personnellement connue, était une période sombre de l'histoire de leur pays. Je pense en particulier à Reinhart Scherm et à Andréas Freund. Ce dernier est arrivé dès novembre 1967 pour préparer une thèse avec Maier-Leibnitz. Ces deux chercheurs, par leurs travaux, démontraient l'excellence des collègues allemands. Ils prouvaient aussi, par leur comportement, que la période du nazisme n'était absolument pas représentative de ce qu'est vraiment l'Allemagne. L'attitude de Bertaut est très significative. Né Lewy en Allemagne dans une famille juive, il avait émigré en 1933. Ses parents qui n'avaient pas voulu le suivre (on ne va pas s'en prendre à des anciens combattants !) périrent en camp de concentration. Il était donc tout naturellement méfiant au début, parlant en français à Maier-Leibnitz. Ensuite il fut heureux de retrouver ses ex-compatriotes complètement débarrassés du nazisme. Alors il n'hésita plus à utiliser la langue allemande.

L'expérience de l'ILL comme celle de l'EMBL et du CERN montrent qu'il n'existe rien de mieux que le travail en commun pour dissiper les préjugés.

Un élément, certainement important dans cette réussite, fut la jeunesse du personnel qui a fait l'ILL dans ses premiers temps. Regardant un film tourné en 1973 par la télévision allemande, je suis frappé par la jeunesse des chercheurs et des ingénieurs qui avaient de grandes responsabilités. Pour tous, la guerre appartenait à un passé qu'ils n'avaient connu que comme enfants.

Grâce sans doute à ces judicieux recrutements des physiciens allemands, l'atmosphère interne à l'ILL fut toujours excellente. Une enquête récente auprès des anciens m'a bien confirmé l'absence totale de conflits, même mineurs, entre Allemands et Français. À l'ILL, le personnel non français bénéficie d'un supplément de salaire, dit prime de dépaysement, pour compenser le fait de vivre à l'étranger¹. Cela n'a jamais posé de graves problèmes, ce qui ne semble pas être le cas à l'ESRF, sans doute parce que l'atmosphère n'y a jamais été aussi détendue.

L'élaboration des statuts des chercheurs pouvait *a priori* poser problème à cause des traditions différentes dans les deux pays. Au CEA (qui sert de référence pour ces statuts), il n'y avait que des postes permanents que l'on pouvait obtenir très jeune ; au CNRS il n'y a aussi que des postes permanents, mais on ne pouvait, en général, les obtenir qu'après la soutenance d'une thèse. En Allemagne, l'usage était jusqu'en 1975 qu'il n'y avait que les professeurs titulaires qui bénéficiaient de postes stables. Après une période pendant laquelle cette coutume fut abolie, on y revient maintenant. Il y a aussi quelques postes permanents dans les centres de recherche gouvernementaux (type Jülich) et les laboratoires de la société Max Planck. Avant de parvenir à ce stade, les chercheurs vont de contrats limités (assistants) à d'autres contrats limités. À l'ILL il a été décidé de proposer aux physiciens recrutés à l'ILL des contrats de cinq ans, qui ne peuvent être transformés en contrats permanents à leur expiration que dans des cas exceptionnels justifiés par des responsabilités particulières. Cette situation, hors des normes

¹ Les règlements européens peuvent interdire cette pratique.

françaises, a été légalisée *a posteriori* par une loi adoptée par le Parlement le 22 décembre 1998, puis par le Sénat le 23 novembre 1999 publiée au Journal Officiel du 2 décembre 1999.

L'équipe projet qui conçut et construisit le réacteur était elle aussi mixte. Là encore, il aurait pu apparaître des problèmes. Les Français avaient une expérience beaucoup plus grande dans la construction des réacteurs, en effet ils avaient commencé plus tôt et avaient une activité dans le domaine militaire. Ce point fut parfaitement reconnu et la conception du bloc pile et le choix de l'aluminium furent complètement laissés aux Français du groupe. Par contre la responsabilité en matière de sûreté fut confiée à un ingénieur allemand, Reutler, qui fit un superbe travail. Tout cela se passa dans une excellente atmosphère ; il est remarquable que, plus de 30 ans après, les liens noués lors de la construction subsistent entre ingénieurs français et allemands (maintenant presque tous en retraite) et que certains continuent à se voir régulièrement.

La vie commune à l'ILL a permis de voir à quel point les Allemands et les Français ont des cultures très proches. Proches mais pas identiques comme l'illustre l'anecdote suivante. Au cours l'été 1973, John White, futur directeur, faisait comme scientifique visiteur l'une des premières expériences de diffusion sur un échantillon biologique, le collagène, et constatait qu'il diffractait étonnamment bien les neutrons. J'eus alors avec lui la conversation suivante :

B.J. Oui, le collagène diffracte bien les neutrons ; aviez-vous des calculs avant l'expérience ?

J.W. Surpris –Heu, non.

B.J. C'est toujours comme cela avec les Anglo-Saxons, ils ne font jamais de calculs préparatoires. Les Allemands eux font de si beaux calculs qu'ils n'ont presque plus besoin de faire les mesures.

J.W. Et les Français ?

B.J. Nous croyons qu'il est nécessaire de faire les calculs, mais nous les faisons rarement.

John White, qui m'a rappelé ce dialogue, en conclut qu'il faut que la recherche soit pluri-nationale, comme elle l'est à l'ILL. Je suis en complet accord avec cette conclusion.

Il n'en alla pas tout à fait de même avec les Britanniques. Il semble, par exemple, qu'il n'existe pas au Royaume-Uni de comités d'entreprise tels qu'ils sont prévus par la loi en Allemagne (Betriebsrat), comme en France. Dans le cas de l'ILL, cela a été pris très au sérieux. Dès 1973 le principe d'une représentation au comité de direction fut discuté et finalement accepté en décembre de la même année. Ceci fut appliqué à partir de la réunion de mai 1974. Au moment de la reconstruction du réacteur et des réductions de personnel qui en résultèrent, la présence de ces représentants du personnel a permis que cette réduction soit l'objet d'un consensus. Ceci a toujours étonné les partenaires britanniques. En Grande-Bretagne, les syndicats ont beaucoup d'adhérents mais ils ne jouent pas un grand, sinon aucun, rôle dans la vie de l'entreprise. Ceci est la cause de malentendus. La décision unilatérale de réduire la participation financière de la Grande-Bretagne n'a, bien entendu, rien arrangé. Il en est resté l'idée de non-fiabilité des institutions britanniques. Tout cela ne semble pas avoir affecté les relations entre collègues de l'Institut, qui sont toujours restées bonnes indépendamment des tempêtes politiques. Un grand nombre de publications ont des cosignataires provenant des trois pays fondateurs (et d'autres pays).

On trouve donc à l'ILL ce qui semble commun à toutes les coopérations internationales au sein desquelles des personnes de diverses nationalités travaillent ensemble : une atmosphère

détendue et harmonieuse, indépendante du pays d'origine de chacun. Mais ces institutions internationales reçoivent leur budget des différents pays participant. Les entreprises internationales sont alors en compétition avec celles existant dans chacun des pays. Dans le cas de l'ILL, cette compétition au niveau du budget est avec les réacteurs et autres sources de neutrons des pays membres. Il en résulte des problèmes pour l'ILL. J'ai évoqué plus haut les problèmes avec la Grande-Bretagne qui résultaient d'une concurrence entre l'ILL et la source à spallation ISIS. Je crois qu'il y a maintenant des problèmes du côté allemand qui peine à pourvoir à la fois au budget de l'ILL et à celui du nouveau réacteur de Munich. S'il est sans doute justifié qu'il existe en Europe plus d'une source de neutrons, il est dommage que ces autres sources aient été construites pays par pays (d'abord la France avec Orphée, puis la Grande-Bretagne avec Isis enfin l'Allemagne avec le réacteur de Munich), au lieu de l'être grâce à la coopération entre les trois pays. On retrouve à ce niveau une partie des difficultés de la construction de l'Europe. Aux États-Unis, la construction des réacteurs de recherche a été faite de façon cohérente, sans duplications coûteuses. Il y a eu des compétitions, et c'est tout naturel, entre les divers centres de recherche pour l'implantation de tel ou tel gros instrument. Une autorité fédérale a alors tranché. Maintenant une source à spallation, dénommée SNS, est en construction dans le laboratoire d'Oak Ridge. Cette machine d'un coût de 1,4 milliard de dollars fonctionnera en 2006. Elle doit produire aux pics d'intensité cent fois plus de neutrons que le réacteur de l'ILL. Cette construction fut proposée par une association des six plus importants laboratoires nationaux dans le domaine du nucléaire (Oak Ridge, Argonne, Brookhaven, Los Alamos, Lawrence Berkeley). Seule une coopération européenne, sans arrière-pensées nationalistes permettrait à l'Europe de ne pas être dépassée dans un domaine dans lequel elle était, grâce à une coopération internationale, jusqu'à maintenant en tête. Cela vaut pour toute coopération européenne qui ne peut réussir que si chaque pays lui accorde une priorité sur les projets nationaux. Il peut être utile de rappeler qu'Airbus Industrie dont les succès techniques et commerciaux sont connus de tous a été créé comme une coopération franco-allemande en mai 1969, deux ans après l'ILL. Le couple franco-allemand a décidément du bon.

Bilan scientifique

J'ai essayé dans ce texte de raconter l'histoire d'un institut dont les prémices remontent à plus de quarante ans. Cela représente une période de temps qui n'aurait rien d'exceptionnel pour une institution scientifique classique ; l'institut Pasteur a plus de cent ans. Mais l'existence de l'ILL repose complètement sur un gros instrument et n'aurait pas de justification si cet instrument venait à disparaître. Cela explique tout le soin, l'énergie et les budgets nécessaires pour l'entretenir. Ces investissements ne se justifient *a posteriori* que si le bilan scientifique est satisfaisant. Je vais tenter de faire ce bilan de façon non exhaustive, ne me sentant pas compétent pour le faire dans tous les domaines de recherche couverts par l'utilisation des faisceaux de neutrons.

Ce bilan est particulièrement spectaculaire dans celui où l'on utilise le neutron comme une *particule fondamentale* dont on étudie les propriétés.

Une expérience récente réalisée à l'ILL permet de bien illustrer ce qui peut être fait avec des neutrons. L'idée était de mettre en évidence les états quantiques dans le champ gravitationnel. La faiblesse de ce champ comparé au champ magnétique rend cette observation difficile.

Le neutron est, à cause de son absence de charge, la meilleure particule pour mettre en évidence ces états. C'est ce qu'a réalisé V.V. Nesvizhevsky². Pour ce faire il a utilisé des neutrons ultra-froids, d'une vitesse inférieure à 6 ms^{-1} , produits par un dispositif mis au point par Steyerl³. Ce dispositif refroidit les neutrons, issus du canal vertical de la source froide, en les faisant se réfléchir sur une surface (faisant partie d'une turbine) se déplaçant dans le même sens que celui des neutrons incidents. Le concept de ce dispositif fut élaboré en 1966. Sa première réalisation fut faite auprès du réacteur de Garching en 1975 ; la turbine fut installée à l'ILL en 1975.

L'expérience mentionnée qui teste la généralité de la physique quantique, y compris dans le champ gravitationnel, n'est pas la seule, dans ce domaine de physique fondamentale, qui ait été réalisée à l'aide de faisceau de neutrons. On sait qu'au début du xx^e siècle un débat opposa Einstein et Bohr sur le fait de savoir si la physique quantique était une théorie complète et s'il n'existait pas des paramètres cachés à trouver. Telle était la position d'Einstein. Des tests expérimentaux ont été proposés et mis en œuvre qui utilisant des photons permettent de rejeter l'existence de ces paramètres. Hasegawa⁴ et ses collaborateurs ont utilisé pour ce test des neutrons. À l'aide d'un interféromètre pour neutrons, ils confirment les résultats obtenus à l'aide de photons, démontrant ainsi que les corrélations entre des systèmes séparés, résultat de l'intrication quantique, n'étaient pas une particularité des photons mais existaient aussi avec des neutrons.

Un gros effort a été fourni par les physiciens pour élaborer une théorie qui rende compte des quatre types de force existant dans la nature : électromagnétique, force faible, force forte et gravitation. Un modèle a été laborieusement élaboré, dit « Le Modèle Standard ». L'utilisation des majuscules montre l'importance accordé à ce modèle. Le neutron se dissocie spontanément en un proton et un électron avec l'émission d'un neutron. Le temps de vie du neutron est de 885,7 secondes. Ce processus est contrôlé par la force faible. C'est le cas le plus simple de radioactivité β . On sait depuis les travaux théoriques de Yang et Lee et la démonstration expérimentale de Wu que, lors de ce processus, la parité n'est pas conservée ; ce qui veut dire qu'il y a une différence entre la désintégration du neutron et celle que l'on observerait dans un miroir. Ceci se traduit par le fait que les électrons sont émis préférentiellement dans une direction opposée à celle du spin du neutron. La mesure, par Abele et ses collaborateurs, de cette asymétrie, associée au temps de vie du neutron permet de déterminer une quantité qui, selon le Modèle Standard, doit être égale à un. Ce qui n'est pas le cas⁵. Cela suggère qu'il faille aller au-delà de ce modèle. Abele travaille à améliorer encore la qualité des mesures. Voilà un domaine dans lequel un réacteur apporte des informations ayant la même portée que celles fournies par les grands accélérateurs, du type de ceux du CERN. On pourrait aussi citer des travaux sur la mesure du moment électrique dipolaire du neutron et l'invariance par rapport au renversement du sens du temps.

J'ai (malgré mon incompetence dans ce domaine) cité ces exemples d'applications des neutrons, pour démontrer que la physique la plus fondamentale peut être étudiée à l'aide de ces particules. Cependant la plus grande partie des 700 et quelque expériences réalisées

² NESVIZHEVSKY *et al.*, Nature, 2002, 415, p. 297-299.

³ STEYERL and MALIK, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1989, 284, p. 200-207.

⁴ HASEGAWA Y., LOIDL R., BADUREK G., BARON M. and RAUCH H., Nature, 2003, 425, p. 45-48.

⁵ La valeur trouvée est 0,9924 avec une erreur possible de 0,0028, donc différant de façon significative de 1. On voit la précision extraordinaire qui peut être atteinte dans certaines expériences.

chaque année à l'ILL portent sur la détermination de structures magnétiques, à la localisation précise des atomes d'hydrogène dans les molécules organiques, y compris les protéines et l'étude des mouvements dans les solides et les liquides. Un très bel exemple est l'étude des mouvements dans les polymères fondus. De Gennes a proposé un modèle de reptation pour en rendre compte. Ce modèle est en concurrence avec d'autres. Il manquait une expérience pour savoir quel était le meilleur modèle. Des expériences utilisant l'un des appareils à écho de spin a permis de trancher en faveur du modèle de Pierre-Gilles de Gennes.

En tout, depuis la création de l'ILL, le travail qui y a été réalisé a donné lieu à au moins 10 000 publications scientifiques dans des revues avec des comités de lecture. De belles expériences ont été réalisées sur des substances magnétiques, domaine qui est l'un de ceux dans lequel les neutrons sont absolument irremplaçables. Environ 28 % des publications traitent de différents aspects de ce thème de recherche.

Les neutrons sont encore plus utiles si on utilise des neutrons polarisés, c'est-à-dire avec tous leurs spins parallèles. Il y a beaucoup de méthodes pour produire des faisceaux de neutrons polarisés. J'en ai brièvement parlé plus haut dans le chapitre sur l'utilité des neutrons. Quand ils sont polarisés, il est possible de renverser le sens de la polarisation. En mesurant la diffusion des neutrons polarisés dans ces sens opposés, on peut déterminer la distribution de l'aimantation dans l'échantillon étudié. Il a ainsi été possible de déterminer quelle était l'origine du magnétisme dans des substances organiques ne contenant aucun métal. Il a aussi été possible de comprendre les effets magnéto-caloriques géants observés dans certaines substances dont la température baisse de 4 °C quand on les désaimante. Cet effet a de possibles applications pratiques pour produire une climatisation non polluante. Il y a d'autres domaines du magnétisme qui sont importants pour la technologie. On sait que les mémoires des ordinateurs font appel à l'aimantation et la désaimantation de petits domaines. Plus ces domaines sont petits, plus la capacité de stockage est grande. Là aussi les neutrons apportent des informations utiles. Le magnétisme n'est pas le seul domaine dans lequel le travail réalisé à l'ILL contribue au développement de la technologie. Un seul exemple : on sait que l'hydrogène est envisagé comme substitut à l'essence. Pour y arriver il y a de nombreux problèmes à résoudre. L'un d'eux est le stockage de ce gaz. Un groupe suisse (professeur Yvon de Genève) étudie l'utilisation, à cette fin, d'alliages qui peuvent absorber de très grandes quantités d'hydrogène. Le matériau idéal n'a pas encore été trouvé. La diffraction des neutrons est parfaite pour étudier ces substances remplies d'hydrogène.

En biologie aussi, le bilan de l'ILL est positif. L'outil principal est ce que l'on nomme variation de contraste. Cette méthode utilise la très grande différence entre les pouvoirs diffusants de l'hydrogène et du deutérium et donc entre l'eau ordinaire et l'eau lourde. Il en résulte que dans la diffusion aux petits angles, qui n'est sensible qu'à la forme de l'objet étudié, il est possible, en utilisant un solvant fait d'un mélange approprié d'eau lourde et d'eau ordinaire, de rendre invisible dans un composé constitué d'acide nucléique et de protéines l'un des deux constituants. Ceci a trouvé de nombreuses applications en enzymologie et en virologie. Un autre domaine, dans lequel la diffusion inélastique des neutrons a apporté des informations utiles, est celui de la dynamique des protéines. Une excellente revue⁶ à ce sujet a été publiée par G. Zaccai.

⁶ ZACCAI G., How soft is a protein? A protein dynamics force constant measured by neutron scattering, *Science*, 2000, 200, p. 1604-1607.

Ces mesures seraient pour la plupart impossibles avec d'autres techniques et il serait très difficile, sinon impossible de faire avec les faisceaux de neutrons d'un réacteur à flux moyen. Certaines de ces applications concernent parfois à des domaines dans lesquels on ne s'attendait pas *a priori* à trouver une utilisation des neutrons. Par exemple Artioli⁷ et ses collègues ont utilisé les neutrons pour comprendre comment était forgée une hache à l'âge de bronze. Ils ont étudié la texture du bronze de la hache en faisant appel à la diffraction des neutrons, qui a l'immense avantage d'être une méthode non invasive et qui permet de tester l'intérieur d'un échantillon assez épais. Les résultats (absence de texture) indiquent que nos lointains ancêtres devaient alterner du travail à froid et des recuits prolongés qui permettent d'éliminer les contraintes induites par le travail à froid. Ceci est un exemple d'application d'une technique très utilisée par les ingénieurs à un problème qui intéresse les historiens des techniques. Pour faciliter aux ingénieurs l'accès aux faisceaux de neutrons et de rayons X pour l'étude des contraintes, un laboratoire a été créé en commun entre l'ILL et l'ESRF, baptisé FaME38. Il est escompté (avec un certain optimisme) que, grâce à ce laboratoire financé par le EPSRC, l'utilisation des scanners à neutrons (ou à rayons X) pour étudier les contraintes sera aussi répandue que celle des scanners en médecine.

Avenir de l'ILL⁸

Dans l'immédiat, la direction actuelle de l'ILL considère que le réacteur sera opérationnel au moins jusqu'en 2020 et qu'il faut absolument qu'il reste compétitif jusque-là. Pour cela elle propose de renforcer les aspects dans lesquels la domination de l'ILL est la plus forte. Elle étudie la mise en place d'une troisième source froide et elle insiste sur le fait qu'il faut que chacun des instruments soit non seulement amélioré mais soit le meilleur possible avec les techniques disponibles.

Mais quelle que soit la qualité de sa réalisation et le soin apporté à l'entretenir, un réacteur doit, un jour ou l'autre, cesser son activité. Il faut y penser et également tenir compte de la mise en route, prévue pour juin 2006, aux États-Unis de la source à spallation SNS ; une source équivalente est prévue au Japon pour 2007. Ces machines sont conçues pour produire des pics de 10^{17} neutrons par centimètres carré et par seconde. La solution qui vient à l'esprit est de prévoir dès maintenant le remplacement du réacteur de l'ILL par une source de neutrons plus moderne et plus puissante. Ce que pourrait être cette source est connu : une source à spallation, comme aux États-Unis et au Japon, qui produirait les neutrons par l'impact de protons de grande énergie sur une cible de métal lourd. Il existe même un avant-projet pour une source européenne à spallation (ESS). Le projet est estimé à 1,5 milliard d'euros, mais il permettrait, comme le SNS, d'obtenir des impulsions de neutrons environ 100 fois plus intenses (au pic de l'impulsion) que le flux fourni par le réacteur de l'ILL. Il faudrait donc pour utiliser de façon optimale cette intensité faire appel aux techniques dites de temps de vol. En 2003 le projet semblait enterré, par le retrait du projet de l'Allemagne et de la Grande-Bretagne. Une note récente parue dans *Nature* (430, p. 493) le 29 juillet 2004, redonne espoir. Il est clair

⁷ ARTIOLI *et al.*, Dans le rapport annuel de l'ILL pour 2003, p. 50.

⁸ Ce qui suit est une vision personnelle dont je n'ai absolument pas discuté avec les responsables actuels de l'ILL et qui donc ne les engage absolument pas.

que le choix d'un site potentiel pour cette machine ne se ferait pas sans difficulté. Mais les arguments mis en avant par Fender pour l'implantation de l'ESRF sur le site de l'ILL me semblent s'appliquer aussi à l'ESS; ce qui assurerait un avenir à long terme à l'ILL qui a fait ses preuves et mériterait de durer au-delà du temps de vie du réacteur actuel.

Remerciements

J'ai bénéficié tout au long de cette rédaction de l'aide sans restrictions des membres présents et passés de l'ILL ou ayant participé à sa construction. Robert Dautray, m'a fourni de très précieuses informations et m'a ramené à une période dont je garde une certaine nostalgie. Je pense en particulier à Reinhart Scherm qui a toujours répondu dans les plus brefs délais à mes courriers électroniques, à Sylvia Brugelmann et à Andréas Freund auxquels je dois de nombreuses informations sur Maier-Leibnitz. Tasso Springer a déniché de vieilles correspondances datant de la préhistoire. Jean Charvolin m'a fait un peu mieux comprendre ce que j'ai nommé les années noires. Philippe Leconte m'a expliqué les problèmes de l'approvisionnement en uranium 235. Alain Filhol, arrivé à l'ILL dès 1971, a toujours répondu à mes appels que ce soit pour préciser un point d'histoire ou m'aider à distance à dépanner mon ordinateur. Il a aussi relu mon texte, y a suggéré des corrections et des additions. Je le remercie tout particulièrement. Les membres français du groupe projet (Jean Chatoux, Jean-Paul Martin et Louis Bregeon) m'ont permis de rafraîchir mes souvenirs sur la construction du réacteur. Francis Tasset m'a beaucoup aidé pour traiter des neutrons polarisés, Pierre Florès, vieux militant syndical a été très coopératif. Robert Gariod, retraité du CENG qui fut très impliqué dans les débuts de l'ILL m'a apporté de précieuses information sur Louis Néel.

Serge Claisse et Brigitte Aubert m'ont procuré les photographies de ce livre. La direction actuelle de l'ILL (Colin Carlile, Werner Press et Christian Vettier) m'a apporté toute l'aide matérielle et morale dont j'avais besoin tout en respectant totalement ma liberté d'auteur. Je les remercie aussi pour une lecture critique de mon texte. G. Zaccai m'a fait d'utiles suggestions. Françoise Vauquois a corrigé de nombreuses fautes de français. Je suis aussi reconnaissant à Claire Gubian, secrétaire de Christian Vettier, qui a toujours su trouver le temps de me procurer les documents nécessaires et d'organiser mes séjours à Grenoble. Cette liste n'est absolument pas exhaustive. Que ceux qui ne sont pas cités me pardonnent.

Chronologie

1961	Première idée d'un réacteur européen à haut flux.
Août 1964	Présentation à Genève du projet français.
19 janvier 1967	Création de l'ILL.
Décembre 1968	Début de la construction.
1 ^{er} mars 1969	Bâtiment ILL1 prêt.
13 février 1970	Accident sur le chantier du réacteur.
6-7 mars 1970	Première visite du SRC.
5 et 6 novembre 1970	Visite du comité avec John Kendrew.
2 décembre 1970	Seconde visite SRC.
Fin 1970	Livraison du bâtiment principal.
31 août 1971	Réacteur critique.
16-21 décembre 1971	Montée du réacteur à pleine puissance.
Juin 1972	Fonctionnement de routine avec sources froide et chaude.
Janvier 1973	Le Royaume-Uni devient membre de l'ILL.
Octobre 1979	Début du programme de modernisation.
Décembre 1981	Prolongation jusqu'au 31 décembre 1992 de l'accord intergouvernemental.
Septembre 1984	Arrêt pour révision générale.
Septembre 1985	Redémarrage avec une source froide verticale neuve.
Janvier 1987	L'Espagne devient partenaire scientifique associé à l'ILL.
Décembre 1987	Mise en place d'une seconde source froide.
Janvier 1988	La Suisse devient partenaire scientifique associé à l'ILL.
Janvier 1990	L'Autriche devient partenaire scientifique associé à l'ILL.
Novembre 1991	Annonce par le SERC de la réduction de la participation britannique à 25 % à partir de 1994.

Janvier 1993	Prolongation jusqu'au 31 décembre 2003 de l'accord intergouvernemental.
1991-1995	Reconstruction du réacteur avec changement du bloc pile.
1 ^{er} janvier 1996	Le centre de recherche Jülich remplace celui de Karlsruhe comme associé allemand.
Novembre 1996	La Russie devient partenaire scientifique associé à l'ILL.
Janvier 1997	L'Italie devient partenaire scientifique associé à l'ILL.
1998	Le consortium MENI regroupant l'Autriche et la Tchéquie devient partenaire associé.
Janvier 2000	Lancement du programme du millénaire.
Décembre 2002	Prolongation jusqu'au 31 décembre 2013 de l'accord intergouvernemental.

Liste des principales personnes impliquées dans l'histoire de l'ILL

Cette liste est incomplète car il n'est pas possible de citer tous ceux qui ont contribué à cette histoire. Pour les chercheurs et ingénieurs de l'ILL, la nationalité n'est pas mentionnée.

AGERON Paul (-1998). Ingénieur et physicien qui construit la source froide et les guides de neutrons.

ARMBRUSTER Peter. Physicien nucléaire. Fut directeur (1989-1992).

ARNDT Ulrich. Ingénieur et cristallographe de Cambridge.

ASTRUC Jean-Marie. Ingénieur.

AVERBUCH Pierre. Physicien de l'Université de Grenoble.

AXMANN Anton. Ingénieur et physicien, responsable de l'électronique.

BACON George. Physicien anglais qui a beaucoup écrit sur les neutrons.

BALLIGAND Pierre (1917-1987). Directeur adjoint du CENG.

BAUER Ekkehardt. Ingénieur en charge du réacteur (1989-2003). Fut le responsable ILL pour la reconstruction du réacteur.

BECKURTS Heinz (1930-1986). Physicien de Karlsruhe. Co-auteur avec Robert Dautray du projet réacteur. Fut assassiné par la fraction Armée rouge.

BERTAUT Felix (1913-2003). Responsable de la cristallographie du CENG et du CNRS à Grenoble.

BLOW David (1931-2004). Pionnier de la cristallographie des protéines.

BRÉGEON Louis. Ingénieur du groupe projet, en charge de la physique du réacteur.

BROCHIER Dominique. Ingénieur en cryogénie.

BROCKHOUSE Bertram (1918-2003). Physicien canadien Prix Nobel 1994 pour son travail de pionnier sur les spectromètres à trois axes.

BROWN Jane. Physicienne cristallographe.

BRUGELMANN Sylvia. Secrétaire de Maier-Leibnitz.

BURLET Paul. Cristallographe du CENG.

CHARVOLIN Jean. Physicien directeur adjoint puis directeur (1989-1994) durant la période de reconstruction du réacteur.

CHATOUX Jean. Chef de projet du réacteur.

CURRAT Roland. Physicien.

CREYSSEL Pierre. Directeur administratif du CNRS.

CRIBIER Daniel. Physicien de Saclay, Directeur de l'Institut Léon Brillouin.

CURIEN Hubert (1924-2005). Directeur du département physique du CNRS, puis directeur général.

DAUTRAY Robert. Auteur du projet de réacteur. A eu ensuite de très grandes responsabilités au CEA dont il devint haut-commissaire.

DIANOUX José. Physicien.

DORNER Bruno. Physicien de l'ILL, spécialiste des spectromètres à 3 axes.

DOUCHIN François. Physicien.

DREYFUS Bernard (1928-2005). Physicien, directeur adjoint (1973-1976).

DREXEL Winfried. Physicien.

DROULERS Yves. Premier chef du service réacteur.

EGELSTAFF Peter. Physicien de Harwell, pionnier de la diffusion inélastique et des sources froides. Au Canada à l'université de Guelph depuis plus de 20 ans.

Von EGIDY. Physicien nucléaire allemand.

EISERMANN Werner. Chef de projet adjoint du réacteur.

FAUDOU Jean-Claude. Ingénieur.

FENDER Brian. Physicien Directeur adjoint puis directeur (1980-1985).

FILHOL Alain. Physicien.

FLOWERS Brian. Chef du *Science Research Council* (SRC).

FRANZETTI Franco. Second chef du service réacteur.

FREUND Andreas. Physicien.

FRIEDEL Jacques. Physicien d'Orsay.

FULDE Peter. Théoricien responsable du groupe transitoire à Munich.

GARIOD Roger. Ingénieur du CENG.

De GENNES Pierre Gilles. Théoricien de Saclay, puis du Collège de France, Prix Nobel (1991).

GENTNER Wolfgang. Physicien nucléaire allemand.

GHOSH Ronald. Physicien.

GOBERT Guy. Ingénieur mécanicien .

GUINIER André (1911-2000). Physicien d'Orsay.

HASENCLEVER Wolfgang. Premier chef de l'administration.

HEIDEMANN Anton. Physicien, élève de Maier-Leibnitz.

HEWAT Alan. Physicien cristallographe.

HIGGINS Julia. Physico-chimiste, Éluée en 1995 *Fellow of the Royal Society* (FRS).

HOROWITZ Jules (1921-1995). Voir le chapitre 2.

IBEL Konrad. Physicien.

IPOUSTEGUY Jean-Robert (1920-2006). Sculpteur.

JACQUEMAIN Michel. Chef des services techniques.

JOLLIFFE a conduit les premières négociations pour le SRC.

KENDREW John (1917-1997). Physicien, cristallographie de protéines. Prix Nobel 1962.

KLAR Bertram. Physicien.

KLEY Walter. Physicien d'Euratom (Ispra).

KOUTS Herbert. Chef du projet du réacteur de Brookhaven.

KOWARSKI Lew (1907-1979). Physicien d'origine russe, de l'équipe de Joliot. Il fut l'un pionnier de la physique des réacteurs ; il dirigea la construction des premiers réacteurs du CEA, puis partit au CERN.

LACAZE Albert. Ingénieur physicien en cryogénie de l'université de Grenoble.

LAJZEROVITZ Janine. Professeur à l'université de Grenoble, cristallographe.

LOMER Mick. Premier directeur adjoint britannique.

LOWDE Ray. Physicien de Harwell.

MAIER Bernd. Physicien ; premier secrétaire scientifique.

MAIER-LEIBNITZ Heinz (1911-2000). Voir le chapitre 2.

MAMPE Walter (1939-1992). Physicien nucléaire.

MARTIN Jean-Paul. Ingénieur du groupe projet.

MASON Sax. Physicien.

MEZEI Ferenc. Physicien inventeur de l'écho de spin et des supermirroirs.

MITCHELL William (-2002). Responsable en Grande-Bretagne du comité pour l'utilisation des faisceaux de neutrons.

MOLL Eckart. Physicien nucléaire.

MOSSBAUER Rudolph. Second directeur, prix Nobel de physique en 1961.

MOUSSA André. Physicien nucléaire de Grenoble.

NEEL Louis (1904-2000). Voir le chapitre 2

NEWPORT Ronald. Responsable du SERC.

NIEFNECKER Hervé. Physicien nucléaire du CENG.

NOZIERES Philippe. Physicien théoricien, membre de l'Académie des Sciences.

PRETSCH Joachim. Responsable au ministère allemand de la recherche.

RAIEVSKI Victor. Physicien, promoteur du projet de pile pulsée d'Euratome.

REUTLER Herbert. Ingénieur du groupe projet responsable des problèmes de sécurité.

ROTH Michel. Physicien.

SCHERM Reinhard. Physicien du début de l'ILL qui devint directeur 20 ans plus tard.

SCHOENBORN Benno. Cristallographe des protéines. Pionnier, à Brookhaven, de l'utilisation des neutrons à la cristallographie des protéines.

SCHWEIZER Jacques. Physicien du CENG qui fut très actif dans la mise en place de la cristallographie.

SHÄRPF Otto. Physicien.

SHULL Cliff. Pionnier de la cristallographie avec neutrons, prix Nobel de physique en 1994.

SIRET Yvon. Responsable de l'informatique.

SPRINGER Tasso. Physicien, directeur adjoint (1977-1980), puis directeur (1980-1982).

STIRLING William. Physicien à l'ILL de 1973 à 1987 ; devenu directeur de l'ESRF en 1951.

STUHRMANN Heinrich. Physicien qui développa des applications des neutrons en biologie.

TASSET Francis. Physicien spécialiste des neutrons polarisés.

TAESCHNER Michael. Ingénieur informaticien.

THOMAS Michel. Physicien, maintenant en charge du bureau d'études.

VETTIER Christian. Doctorant, devenu en 1999 directeur adjoint.

VILLAIN Jacques. Physicien théoricien.

VOLINO Ferdinand. Physicien.

WEIL Louis (-1968). Professeur à l'université de Grenoble, directeur du laboratoire de recherche sur les basses températures.

WHITE John. Physico-chimiste néozélandais, directeur adjoint (1975-1977) puis directeur (1977-1980).

ZACCAI Giuseppe. Physicien puis biologiste.

Annexes

Annexe 1. Convention intergouvernementale franco-allemande

Convention entre le gouvernement de la république française et le gouvernement de la république fédérale d'Allemagne sur la construction et l'exploitation d'un réacteur à très haut flux.

Le Gouvernement de la République Française

et

Le Gouvernement de la République Fédérale d'Allemagne,

- soucieux de poursuivre la mise en application des dispositions du Traité franco-allemand du 22 janvier 1963, en particulier, de celles relatives au développement de la coopération scientifique entre les deux pays,
- considérant l'intérêt des recherches qui ont déjà été effectuées tant en France qu'en République Fédérale d'Allemagne dans le domaine de la physique nucléaire et de la physique du solide,
- constatant, qu'en Europe, des installations nouvelles sont nécessaires au développement de ces recherches,
- désireux que d'autres États européens puissent participer aux actions qu'ils se proposent d'entreprendre en commun,

ont décidé de promouvoir la construction et l'exploitation à des fins pacifiques d'un réacteur à très haut flux de neutrons et sont en conséquence convenus des dispositions suivantes :

[ARTICLE I]

1. La construction et l'exploitation du réacteur qui fait l'objet de la présente convention sont confiées à une société civile dont les associés sont la Société à responsabilité limitée « Gesellschaft für Kernforschung mbH », d'une part, le « Commissariat à l'énergie atomique » et le « Centre National de la Recherche Scientifique », d'autre part.

2. La Société dont les statuts sont déposés auprès des deux gouvernements :

- n’entreprendra d’activités qu’à des fins pacifiques,
- est désignée sous le nom d’Institut Max von Laue-Paul Langevin,
- aura son siège à Grenoble,
- sera dirigée par une haute personnalité scientifique allemande,
- utilisera pour ses travaux la langue française et la langue allemande.

en outre :

- les membres français et allemands du Comité de Direction de la Société ne peuvent être nommés et révoqués qu’avec l’accord de leur Gouvernement respectif ;
- les litiges survenus entre les associés sont soumis aux gouvernements lorsqu’ils n’ont pu être réglés à l’amiable ;
- les associés demanderont l’approbation conjointe des gouvernements pour toute modification des statuts ;
- de nouveaux associés pourront être admis une fois que la construction du réacteur, de ses installations annexes et de ses dispositifs d’expérimentation sera achevée.

[ARTICLE II]

1. Les deux Gouvernements s’engagent à mettre à la disposition des associés :

- d’une part, une somme de 163 millions de francs français (132 millions de DEM) destinée à couvrir les dépenses de construction du réacteur ;
- d’autre part, et à concurrence de 43 millions de francs français (35 millions de DEM), une subvention annuelle destinée à couvrir les dépenses d’exploitation.

2. Chaque Gouvernement participe pour moitié aux dépenses prévues à l’article II paragraphe 1 ci-dessus. Toutefois pendant la phase d’exploitation du réacteur dont le début est fixé par le Comité de Direction de la Société, les dépenses de fonctionnement sont réparties à raison de 49 % pour le Gouvernement de la République Fédérale d’Allemagne et de 51 % pour le Gouvernement de la République Française. Le montant de cette participation de chacun des gouvernements devra tenir compte de certaines recettes fiscales perçues par chacun des deux États à l’occasion de la création et du fonctionnement de la Société.

3. Si le montant des dépenses est supérieur aux sommes fixées au paragraphe 1 ci-dessus, les deux Gouvernements après avoir pris l’avis des organes compétents de la Société, se consulteront pour déterminer les moyens de poursuivre en commun la construction et l’exploitation du réacteur. Les deux Gouvernements se consulteront également si les taux de change en vigueur lors de la conclusion de la présente convention viennent à varier.

4. Les deux Gouvernements s’assurent que les sommes mises à la disposition de la Société pour la construction et l’exploitation du réacteur sont employées dans les conditions les meilleures et prennent les mesures nécessaires à cet effet.

[ARTICLE III]

Sous réserve des exigences de l'ordre public et de la sécurité publique, chaque Gouvernement s'engage à faciliter le déplacement et le séjour des nationaux de l'autre partie contractante employés par la Société ou qui seront appelés par elle à effectuer des travaux de recherches.

[ARTICLE IV]

1. La présente convention est ouverte à l'adhésion des États tiers. Toute adhésion doit recueillir l'agrément des Gouvernements signataires. Les conditions de l'adhésion font l'objet d'un accord entre les Gouvernements signataires et le Gouvernement de l'État adhérent.
2. Au cas où les autres États membres de la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique souhaiteraient adhérer à la Convention, les deux Gouvernements s'efforceraient de placer les activités de la Société dans le cadre du programme de recherches établi par cette Communauté.

[ARTICLE V]

1. Les différends relatifs à l'interprétation ou à l'application des dispositions de la présente convention seront réglés par voie de négociation entre les deux Gouvernements.
2. Si les deux Gouvernements ne parviennent pas à un accord sur la solution d'un différend, chacun d'eux peut soumettre celui-ci à la décision d'un Tribunal d'arbitrage composé de trois membres.
3. Chaque partie contractante désigne dans un délai d'un mois un arbitre; les deux arbitres ainsi désignés choisissent parmi les ressortissants d'un État tiers, dans un délai de deux mois à compter de leur nomination, un surarbitre qui assumera les fonctions de président du Tribunal d'arbitrage.
4. Si les délais prévus à l'alinéa 3 ne sont pas observés et à défaut d'un autre arrangement, chaque partie pourra prier le Président de la Cour de Justice des Communautés Européennes de procéder aux nominations nécessaires.
5. Le Tribunal d'arbitrage prend ses décisions à la majorité des voix.
6. Le Tribunal d'arbitrage prend ses décisions sur la base des dispositions de l'article 38 paragraphe 1 du Règlement de la Cour Internationale de Justice. Ses décisions sont obligatoires.
7. Le Tribunal fixe ses règles de procédure selon les modalités prévues au chapitre 3 du Traité de La Haye du 18 octobre 1907.
8. Chaque partie prend à sa charge ses propres frais et la moitié des frais du Tribunal d'arbitrage.
9. Les dispositions du présent article, à l'exception de celles du paragraphe 6 ci-dessus, sont applicables lorsque des différends surviennent entre les associés au sujet du fonctionnement de la Société et doivent être soumis à leurs Gouvernements en vertu de l'article 24 des Statuts. Le Tribunal délibère sur la base des règles de droit applicables au litige considéré.

[ARTICLE VI]

La Présente Convention s'appliquera également au Land de Berlin sauf déclaration contraire faite par le Gouvernement de la République Fédérale d'Allemagne au Gouvernement de la République Française dans les trois mois qui suivront l'entrée en vigueur de la présente convention.

[ARTICLE VII]

1. La présente Convention entrera en vigueur dès que les deux Gouvernements se seront mutuellement informés de l'accomplissement des procédures constitutionnelles nécessaires à cet effet.
2. La présente Convention est conclue pour une durée de 13 ans.

À l'expiration de ce délai, elle sera prorogée d'année en année par tacite reconduction et ne pourra être dénoncée qu'avec un préavis d'un an.

EN FOI DE QUOI, les représentants des deux gouvernements ont signé la présente convention et y ont apposé leur sceaux.

Fait à Grenoble, le 19 janvier 1967, en double exemplaire en langue française et en langue allemande, les deux textes faisant également foi.

Pour le Gouvernement
de la République Française

Alain PEYREFITTE
*Ministre Délégué
Chargé de la recherche Scientifique
Et des questions atomiques et spatiales*

Pour le Gouvernement
de la République Fédérale d'Allemagne

G. STOLTENBERG
*Ministre fédéral
de la recherche scientifique*

Annexe 2. Rapport d'activité présenté par Maier-Leibnitz en 1968

Dans ce rapport, Maier-Leibnitz expose sa conception de ce que doit être l'Institut Laue-Langevin. Le texte a été laissé tel quel (avec ses petites fautes de français). Je pense qu'il a été rédigé directement en français.

INSTITUT MAX VON LAUE-PAUL LANGEVIN

GRENOBLE

13 novembre 1968

LE RÔLE DU RÉACTEUR À HAUT FLUX DANS LA RECHERCHE DE LA MATIÈRE SOLIDE ET LIQUIDE

Par le Prof. Maier-Leibnitz

A. Général

L'utilisation des neutrons lents permet un nombre d'expériences spéciales et parfois uniques dans le domaine de la recherche fondamentale. Le Réacteur à Haut Flux étant la source la plus forte du monde de tels neutrons, a été choisi, après de longues discussions qui ont commencé dans le cadre de l'O.E.C.D., comme instrument qui est suffisamment grand pour être utilisé par les chercheurs de plus d'une nation et qui peut stimuler la recherche dans des champs intéressants, surtout sur l'état solide où, après les travaux fondamentaux d'il y a 40 ans, les contributions provenant de l'Europe n'ont pas connu un accroissement aussi important qu'on voit dans les grands pays et qui semble être justifié là et par le progrès dans notre connaissance de la matière et par la multitude d'applications.

B. Les autres laboratoires du réacteur

Les grands réacteurs (surtout Brookhaven et Oak Ridge) donnent autant de neutrons que le réacteur proposé pour Grenoble et l'on pourrait penser que – avec un délai de cinq ans avec ces réacteurs – il ne restera plus beaucoup de travail intéressant. Nous avons dû regarder ce point avec attention, en utilisant notre expérience approfondie avec un réacteur et notre connaissance d'un grand nombre d'autres réacteurs. Certes, beaucoup de beau travail est fait sur les réacteurs existants. Pourtant, partout, ou presque partout, on pourrait faire mieux. À tout réacteur on peut trouver une des objections qui suivent :

- 1) Souvent, le réacteur sert en première ligne pour les irradiations, loops, production d'isotopes, mesures de réactivité, etc., et le travail sur faisceaux de neutrons n'a pas assez de priorité pour bien pouvoir utiliser l'équipement et le temps des chercheurs. Parfois, l'esprit d'ambiance n'est pas favorable à la recherche pure. Cela peut décourager les scientifiques, surtout ceux qui ne sont pas eux-mêmes « du métier ».
- 2) La plupart des expériences utilisant les réacteurs, sauf peut-être sur la diffraction des neutrons, sont encore faites par les spécialistes de la physique des neutrons et non pas les physiciens des champs comme la physique du solide, d'où les bons problèmes prennent leur origine.
- 3) Dans beaucoup de laboratoires, la théorie est trop faible, ce qui conduit à un choix des expériences souvent sans bonne relation avec le « courant » du progrès en physique.
- 4) Presque partout, les réacteurs sont « sous-peuplés » de scientifiques. Le rendement des installations coûteuses pourrait être bien meilleur s'il y avait assez de physiciens pour faire ces mesures nuit et jour, pour vraiment évaluer les résultats, pour trouver des problèmes nouveaux et pour élaborer des méthodes perfectionnées.
- 5) Sauf quelques exceptions remarquables, il n'a pas été possible de créer une organisation d'accueil pour les scientifiques visiteurs appartenant aux universités et aux autres laboratoires.
- 6) Il nous semble que presque partout, les méthodes d'expérimentation ne sont pas à la hauteur du perfectionnement du réacteur même. C'est peut-être dû au nombre relativement faible

des chercheurs utilisant un réacteur (en comparaison, par exemple, avec les accélérateurs), que la plus grande partie de l'équipement est relativement conservateur et non optimisé.

- 7) Dans beaucoup de cas, la recherche de meilleures méthodes montre qu'il faudrait faire des changements sur les réacteurs ou même sur les bâtiments ou sur le site qui ne sont plus possible après la construction.

C. Le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin

Les considérations esquissées ci-dessus nous ont guidées dans tous nos plans pour le réacteur. Surtout, nous avons prévu, ou espérons obtenir, les conditions suivantes, favorables, nous l'espérons, pour la réussite de notre entreprise.

- a) Le réacteur est, comme d'ailleurs à Brookhaven H.F.B.R., destiné à la recherche seulement. Il est un réacteur à faisceaux de neutrons ; des irradiations seront possibles pour un nombre limité d'échantillons de petites masses pour ne pas interférer avec le fonctionnement des expériences sur canaux.
- b) Le bâtiment réacteur contient une surface pour expériences plus vaste que les autres réacteurs (diamètre de 60 m). Cette surface est séparée de la surface d'exploitation. Le plan expérimentateur est au niveau d'un remblai à l'extérieur ; cela permet de faire passer les neutrons hors du bâtiment jusqu'à plus de 500 mètres (expériences de temps de vol, etc.).
- c) Le réacteur, avec sa protection, les canaux, les conduits de neutrons, la source froide et la source chaude ont été projetés en coopération avec les expérimentateurs, futurs utilisateurs du réacteur. Nous pensons que le réacteur offrira un nombre d'avantages pour ces derniers. Nous espérons pouvoir installer un nombre optimum d'expériences (peut-être 40) autour du réacteur, et on pourra appliquer un nombre de techniques qui ne sont pas possibles sur les autres réacteurs.

Voici une liste non complète des avantages :

- Flux de neutrons constant (barre de contrôle à l'intérieur du cœur). Protection importante pour réduire le bruit de fonds dans le hall et au dehors.
- Niches près des canaux pour installations variables près du cœur, avec protection du sable fluidisé.
- Source froide (50 fois plus d'intensité pour les neutrons très lents).
- Source chaude (20 fois plus d'intensité autour de 500 meV).
- Canaux à ouverture 230 mm hors de la zone D₂O.
- Canal transversal avec suppression de toute radiation directe du cœur du réflecteur.
- Canal vertical semi-traversier à grande ouverture.
- 10 conduits de neutrons 3 × 16 cm : suppression de tout bruit de fonds non causé par les neutrons lents, augmentation de la surface utile pour faisceaux sortant ; long parcours sans perte d'intensité pour temps de vol. Séparation des expériences dans l'espace.

d) En même temps, avec le projet du réacteur, le travail a commencé sur les appareils pour expériences. Après discussion des méthodes nouvelles ou améliorées, utilisant des conduits de neutrons, des systèmes de cristaux monochromateurs, des méthodes de temps de vol, des systèmes de détecteurs multiples, etc. Par ces développements, coûteux, mais pas coûteux en comparaison avec le coût annuel du réacteur, nous espérons gagner autant en intensité ou en résolution pour nos expériences que par le réacteur même.

D. Organisation du travail scientifique

a) Le nombre de chercheurs qui pourront travailler à GRENOBLE ne peut évidemment pas être fixé aujourd'hui, mais nous pensons qu'il sera autour de 200 dont 50 à 70 pour cent visiteurs. Nous espérons qu'un nombre important parmi eux pourra être des boursiers de thèses pour que notre Institut puisse contribuer à la formation des jeunes dans un domaine moderne et important.

Le budget (sans tout ce qui est exploitation du réacteur « Reaktorbetrieb », mais avec salaires, dépenses pour expériences nouvelles et existantes, nouveaux bâtiments après la première tranche) sera de 25 millions de francs environ par ans, ce qui devrait être en bonne relation avec le nombre de chercheurs.

Quand le réacteur sera prêt en 1969, on aura un bâtiment laboratoires de 3 000 m² environ et un hall d'essais pour grandes expériences, des ateliers, etc. On espère profiter de la coopération avec le CENG et avec les laboratoires de GRENOBLE du CNRS pour les grands ateliers, l'électronique, les basses températures, les ordinateurs, la préparation des cristaux, etc. Mais nous savons que cette coopération requiert que nous soyons partie prenante, et que les contributions venant de notre Institut doivent être attractives pour nos partenaires.

b) Structures d'accueil. Tout nouveau venu est frappé par la complexité des expériences autour d'un réacteur, par les précautions qu'il faut prendre et par les techniques qui sont peu connues à la plupart des chercheurs mais dont la tradition et le développement font le secret du succès d'un laboratoire de réacteur. C'est pourquoi il faut faire tout, pour donner aux chercheurs, et surtout à ceux qui viennent d'autres laboratoires toute information et aide pour leur expérience. Les méthodes à suivre ne sont pas encore élaborées. Nous pensons aux stages suivants :

- Informations sur les recherches semblables à l'expérience proposée : discussion et optimisation de la méthode.
- Dessins et peut-être construction à GRENOBLE de certaines parties de l'appareil, surtout la partie en pile et la protection. Peut-être coordination par un « projet engineer » comme à OAK-RIDGE.
- Aide pendant l'expérience par les techniciens, et si nécessaire par les chercheurs de l'Institut.
- Évaluation des données par les méthodes développées par l'Institut pour toutes les expériences.

c) Relations avec les autres laboratoires. Le programme autour du réacteur est la plus grande responsabilité du Conseil Scientifique qui est composé de 16 membres, moitié français, moitié allemands. La plupart des membres ne sont pas membres de l'Institut LAUE-LANGEVIN.

Ils sont réélus tous les deux ans, et nommés par le Comité de Direction, organe suprême. Dans la première phase qui n'est pas encore déterminée, la grande partie du programme a été, outre le travail de définir quelques caractéristiques du réacteur, de décider sur le choix d'appareils et de méthodes pour les futures expériences. Après cette phase, et commençant maintenant, la tâche importante est l'élaboration du programme scientifique. Le Conseil Scientifique reçoit et considère toute proposition d'expériences provenant d'autres pays sera possible dans le futur, et la coopération avec des individus chercheurs est toujours sans formalité).

Le Conseil Scientifique a quatre sous-comités : diffusion élastique (diffraction et diffusion à petits angles), diffusion inélastique, évaluation des données, physique nucléaire. Pour le moment, l'activité de ces comités concerne en première ligne le choix et le développement d'appareils autour du réacteur.

Pour le moment, les « neutronistes » dominant dans ces comités parce qu'ils connaissent les possibilités et les problèmes d'un réacteur. Mais dans le futur, la situation sera différente. On espère que les deux tiers environ des expériences au réacteur seront proposées par les chercheurs qui ne sont pas membres de l'Institut LAUE-LANGEVIN et seront exécutés soit par eux-mêmes avec l'aide technique dont on a parlé plus haut, soit par eux, en collaboration avec les chercheurs de GRENOBLE. Dans quelques cas, il sera possible de faire des mesures « sur commande » avec des substances qui sont envoyées par un laboratoire.

Quand le réacteur sera prêt, on aura un comité des utilisateurs présidé par un chercheur venant de l'extérieur pour assigner les positions et appareils au réacteur, le temps pour la préparation, les mesures et l'aide technique.

Le Conseil Scientifique, quand à lui, pourra bientôt changer de composition pour mieux représenter les utilisateurs non spécialistes du réacteur.

Nous sommes très conscients du fait que, même si la valeur exceptionnelle du réacteur pour la recherche est connue, il n'est pas facile de convaincre les chercheurs qui sont contents de leur travail dans leurs propres laboratoires, qu'il vaille la peine d'élargir leur activité, de former un groupe pour GRENOBLE, de trouver des problèmes qui peuvent être résolus avec le réacteur, ou même d'inventer des expériences nouvelles.

Nous ferons un effort de bien informer tous ceux qui pourront s'intéresser au réacteur. L'année prochaine, on aura la première école d'été qui nous permettra d'initier une quarantaine d'étudiants aux applications du réacteur pour la physique des solides et liquides. Nous pouvons offrir d'inviter les intéressés de venir à GRENOBLE pour un séjour court ou plus long, ou de venir nous-mêmes aux autres laboratoires pour discuter de nos problèmes. On commence maintenant à GRENOBLE d'avoir des séminaires réguliers sur la physique du solide en vue de nos applications, avec une audience très limitée il est vrai pour le moment, et nous espérons étendre cela dans le futur.

Un effort relativement important a déjà commencé, c'est le travail d'un groupe de théorie qui, dans notre opinion, est indispensable pour développer un bon programme. En regard à la situation particulière de GRENOBLE, ce groupe a commencé à MUNICH. Il comprend maintenant des théoriciens. Cette année, on a eu un programme de visites de ces théoriciens à GRENOBLE, où quelques-uns seulement travaillent en permanence. On espère pouvoir obtenir une répartition entre MUNICH et GRENOBLE au cours de l'année prochaine ; en même temps qu'une augmentation vers le nombre final qui sera vingt.

Annexe 3. Visite du SRC en mars 1970. Conclusions

Conclusions du compte rendu fait par Jolliffe de la visite effectuée le 6 et 7 mars 1970 par le SRC

I would summarize my impression thus:

- (1) Despite difficulties of Franco-German collaboration, the project seems to be going forward fast and smoothly and they hope it will be in operation by mid-1971.
- (2) It appears to be costing about 25 M£ capital and running costs are estimated at 4 M£.
- (3) Collaboration with UK, which would chiefly benefit UK for the next 5-7 years, was freely offered and warmly welcomed.
- (4) Detailed information was freely given and anything more we want was promised.
- (5) The success of the scheme so far is, in substantial measure, due to the Director, Prof Maier-Leibnitz and his policy of appointing able senior staff at an early stage.

Annexe 4. Lettre envoyée par fax en janvier 1972 par Brian Flowers à Creyssel, président du comité de direction de l'ILL en janvier 1972

La date précise de ce fax doit être le 23 ou 24 janvier 1972. J'ai reproduit le texte tel qu'il fut transmis (sans commentaires) par Creyssel le 24 aux autres membres du comité de direction.

May I start by congratulating your election as president of the ill and wishing the institute every success in the new year.

At our meeting on 14 December we explored most of the possibilities for collaboration between the franco german ill and the SRC on the provision of high flux neutron beams. My summary of the meeting was:

(A) The French and German representatives rejected the exploratory proposal which the SRC had made in Grenoble for a collaborative high flux neutron beam programme based on partnership in the use proposed HFBR in the UK.

They did not think it necessary to decide on the building of a second high flux reactor for some years and in any case would not wish to combine irradiation facilities and neutron beam facilities in the same reactor. For the UK, the AEA and SRC explained that the limited funds available made it important to provide both irradiation and neutron beam facilities in the proposed programme and that experience proved it perfectly satisfactory to provide both in one reactor.

(B) You stressed the desirability of the SRC becoming a full partner in the ill as soon as possible.

You proposed that the SRC should pay, in addition to its one-third share of the budget less taxes agreed each year, an initial capital contribution of 13 M Francs a year at January 1972 prices for ten years. You assessed this as being to equivalent to about 72% of a full

one-third share of the capital cost. If the SRC joined ILL, France and Germany would agree, for a number of years to be determined, to undertake high flux neutron beam research only in collaboration with the UK. If, during that period it were decided to build a second reactor jointly, that reactor would be in UK.

(C) The French and German representatives recognised that the decision of how best to provide high flux neutron beam facilities posed severe problems for the UK. They therefore indicated that if, having joined the ILL, the SRC still wished to carry out the design study of the HFBR, they might be willing to adjust the rate of payment of the annual contribution towards the capital costs of Grenoble reactor. This might enable the capital contribution in 1972 and 1973 at a lower rate than 13 M Francs a year.

(D) The SRC appreciated the proposals described in (B) and (C) but, as became clear after the recess, the funds available for the UK programme were not sufficient to enable the SRC to become a partner in ILL and also to collaborate with the AEA in pursuing the HFBR proposal.

(E) Professor Maier-Leibnitz suggested that the possibility of converting the ILL into a widely based European organisation like CERN should be examined. Such an arrangement could help to resolve the SRC financial problem but both French and German representatives considered that it would be impracticable to widen the collaboration to such an extent.

(F) As at earlier meetings, neither the French or German representatives were authorised to discuss the SRC request for information about possible financial arrangements under which British scientists could be permitted to carry out an approved programme on the Grenoble reactor. The SRC had in mind the possible use of up to about 10% of the capacity under such arrangements.

The meeting ended without our being able to see a way to achieve a joint European programme which would satisfy the different requirements of France and Germany on one hand and the UK on the other. We therefore provisionally arranged to meet again on 2 February in case there were any further ideas for satisfying the different requirements in a single acceptable programme to discuss and in case the French and German representatives were by then authorised to discuss possible arrangements for a limited use of the Grenoble reactor by British scientists.

Since then, despite earnest consideration with AEA and other bodies concerned in the UK, the SRC has so far been unable to develop any practicable scheme which likely to meet both French and German wishes and the British needs. On the other hand, our annual revision of the whole financial programme is not yet far enough advanced to enable us to say whether any possible adjustment of the rate of SRC capital contributions towards the ILL could offer a way of resolving the difficulties. We should, therefore, on 2 February be unable to add anything substantial to what we said in Paris last month.

We would still welcome the meeting if you were able to discuss possible financial arrangements on the lines of those originally suggested by the SRC for limited use of the Grenoble reactor by British scientists or if you had succeeded in developing any new ideas. However, if the Franco-German partners in the ILL are, like SRC, unable to add to the views expressed at the December meeting, I suggest it would be best to postpone the proposed meeting for a few weeks. I would however suggest that if do postpone the meeting we should aim for another date in April or May.

B.H. Flowers

Annexe 5. Mémoire de Fender recommandant la construction de la source européenne de rayonnement synchrotron sur le site de l'ILL

Toute la partie scientifique qui détaille les applications du rayonnement synchrotron a été omise.

21 February 1984

THE EUROPEAN SYNCHROTRON SOURCE AT THE ILL

INTRODUCTION

This paper proposes the European synchrotron source should be sited at the Institut Laue-Langevin at Grenoble. There are three main arguments:

1. The synergic effect of coupling the world's leading neutron research centre with a "state of the art" X-ray synchrotron source.
2. The ILL infrastructure is an excellent base for the new source. Technical expertise associated with neutron research is readily transferable. The site itself is well adapted to the proposed ESRF and considerable saving in time and money is possible.
3. The style of operation of the ILL: the international collaboration; the co-operation between visitor and in-house research; the provision of research facilities for long and short-term visitors, which lie at the heart of the Institut's success, are entirely appropriate to a synchrotron research centre – they provide the best possible general guarantees that the ESRF can be built up to be an equally effective Institute in the minimum time.

The combined effect of the ILL and the ESRF (called the Maxwell Institute for convenience) would be to create a centre for condensed matter and materials research quite unequalled anywhere else. The ILL already draws scientists from all over the world in collaborations with European scientists. The focussing effect of the ILL-Maxwell would be even greater and the influence on European research profound.

THE CASE FOR THE EUROPEAN SYNCHROTRON SOURCE

The detailed arguments for a "state of the art" X-ray synchrotron source are advanced in several papers and are not restated here. We underline the simple point that the scattering of X-rays provides most of our direct information about the structure of substances down to the atomic level. Much of our understanding therefore in physics,

[...]

CO-EXISTENCE OF THE MAXWELL INSTITUTE AND THE ILL

It is important to emphasise that this proposal is not a take-over bid by the ILL for the ESRF. At first sight this view, taken with the arguments we have previously advanced, might

seem to imply two distinct and apparently contradictory philosophies. One is to preserve a separate identity and independence for the new synchrotron source and the existing ILL; the second is to achieve the maximum scientific interaction and technical co-operation coupled with considerable financial and manpower savings. In fact the two aims can be achieved easily by adaptation of the existing ILL structure.

Independence is achieved for the new Maxwell Synchrotron Institute by the following major recommendations:

- a) There should be a separate Directorate plus the Services of the Direction.
- b) There should be a separate Scientific Council and sub-committee system.
- c) The scientists, immediate technical support and Accelerator Department should be the separate responsibility of the Maxwell Institute.
- d) A matching organisation is retained by the ILL with the Reactor Department instead of the Accelerator Department.
- e) For these separate departments, and for ILL or Maxwell investments, individual budget lines would be provided, with transfers between Institutes only possible with the approval of the Steering Committee.

Several departments would be run jointly by the two institutes: Instruments and Methods, Site and Buildings, Computing and Administration. The management of these departments is ensured by the combined directorates meeting regularly with all Heads of Department and Senior Scientists.

Annexe 6. Intervention du Dr Newport au comité de direction du 28 novembre 1991

Dr Newport's statement was as follows:

As the Associates will be aware, the Science and Engineering Research Council (SERC) has conducted a review of relative scientific priorities for future council support, having regard to known future resource availability. The Council has now concluded that financial expenditure on the neutron sources at ILL and ISIS should be reduced by £5 millions per annum beyond previously planned levels with effect from 1994/1995. The resources so released would make possible the support of other high priority science.

In the light of its recent review of UK neutron science, the Council has further decided that financial support for the ISIS facility should remain broadly in line with currently planned levels. Accordingly the SERC has advised the UK Government that it will need to seek a reduction in the level of the UK's contribution to the ILL, post 1993.

At present the ILL is out of commission for repairs, and is likely to remain closed for a considerable time. Subject to a satisfactory outcome to the present assessment of refurbishment costs for the reactor; agreement on how these costs should be met; and on future terms for

membership, the UK would hope to see the refurbishment proceed and to remain a partner following recommissioning.

It has to be emphasised, however, that the UK, with other Associates, will need to be finally satisfied about the level of refurbishment costs and the extent to which these can be met from within existing available resources.

Annexe 7. Interprétation par Ipoustéguy de l'ensemble « La marche de l'homme vers son unité », réalisé pour l'ILL

1 Le feu originel.

2 Le premier membre de l'homme qui est créé.

3 Prométhée (le foie dévoré par un vautour).

4 La bombe atomique détruit l'homme

physiquement = jambes déchirées.

génétiquement = membres déformés.

5 La jeune femme enceinte, forte de l'espoir de l'homme nouveau, est tendue vers l'avenir.

5bis Le début de l'accouchement = jambes écartées pour l'expulsion de l'enfant.

6 Le travail d'accouchement = ventre allongé.

Le cadre représente le travail nécessaire à l'accouchement.

7 L'expulsion ; l'enfant tête en bas, expulsé vers son destin mais attaché à un cadre, la vie de travail qui l'attend.

8 L'enfant devenu homme :

- va entrer dans l'Institut (la science, la recherche) ;
- il est caparaçonné contre l'atome ;
- il est poussé par la jambe droite ;
- il est retenu par la jambe gauche ;
- les bras tendus vers l'avenir (il y va) ;
- les mains relevées dans un geste de crainte ; il appréhende ce qui l'attend tout en se sentant l'obligation d'y aller ; que sera son avenir ?

9 L'Institut = son destin de travail est représenté par le cadre par lequel il doit passer.

Index des noms propres

A

Ageron, 11, 12, 48, 80, 85, 115
Armbruster, 48, 59, 67, 114
Arndt, 70
Astruc, 80
Averbuch, 31
Axmann, 88

B

Balligand, 48, 59
Bauer, 95, 121
Beckurts, 48, 50, 51, 59
Bertaut, 6, 7, 11, 12, 30, 54, 59, 70,
132
Blow, 70
Brégeon, 76
Brochier, 89
Brown, 122
Brügelmann, 24, 27
Burllet, 69

C

Charvolin, 11, 112, 119
Chatoux, 18, 53, 60, 73, 74, 79
Creysse, 102
Cribier, 59
Curien, 56
Curat, 66

D

Dautray, 11–13, 15, 18, 48, 50, 51,
59, 60, 79, 121, 131
Day, 114

Dianoux, 66
Dorner, 68, 99
Douchin, 69
Drexel, 68
Dreyfus, 59
Droulers, 61, 73, 79, 92, 95

E

Egelstaff, 6, 9, 10, 97
Eisermann, 56, 79

F

Faudou, 90
Fender, 108, 114
Filhol, 69, 85, 90, 110
Flowers, 102, 103
Franzetti, 75, 95, 117
Freund, 27, 72, 109, 132
Friedel, 54
Fulde, 59

G

Gariod, 89
de Gennes, 31, 44, 65, 136
Gentner, 23, 107
Ghosh, 85
Gobert, 64, 69, 90
Guinier, 54

H

Hasenclever, 59–61
Heidemann, 24, 97
Hewat, 99, 104

Higgins, 104
Horowitz, xvi, 11–13, 15, 18, 28,
48, 51, 56, 102, 103, 114,
131

I

Ibel, 71, 99
Ipousteguy, 92

J

Jacquemain, 61, 90

K

Kendrew, 37, 101, 106, 107, 141
Klar, 70
Kley, 15
Kouts, 48, 50, 51, 53
Kowarski, 5, 8–10, 18, 21

L

Lacaze, 6, 12, 89
Lajzerovitz, 65
Lomer, 112, 124
Lowde, 9

M

Maier, 64, 96
Maier-Leibnitz, xiv, 7, 9–11, 13,
15, 21, 30, 31, 47, 48, 52–
54, 56, 57, 59, 60, 63, 64,
67, 69, 71, 72, 79, 84, 91,
95–97, 99, 102, 104, 108,
112, 131, 132
Martin, 11, 74, 121

Mason, 104
 Mezei, 42, 99
 Mitchell, 9, 18, 101–104
 Moll, 67
 Mössbauer, 87, 96, 103, 104

N

Neel, 15
 Néel (1904-2000), xvi, 6, 7, 11–13,
 28, 47, 54, 59, 73, 90, 101
 Newport, 124
 Nozières, 31, 96

P

Pretsch, 9, 12, 59

R

Raievski, 12
 Reutler, 74, 75, 133
 Roth, 66

S

Schärpf, 71, 100
 Scherm, 64, 68, 114, 132
 Schoenborn, 37, 99
 Schull, 3, 15, 29, 33, 37
 Schweizer, 70, 90
 Shärpf, 71
 Siret, 87, 88
 Springer, 7, 11, 13, 24, 47, 48,
 54, 59, 71, 84, 88, 114
 Stirling, 59, 104, 110
 Stuhmann, 37, 99

T

Taeschner, 86
 Tasset, 35, 90
 Thomas, 65

V

Vettier, 90, 114
 Villain, 65
 Volino, 66
 von Egidy, 68

W

Weil, 6, 12, 89
 White, 9, 102, 133

Z

Zaccai, 104, 136

Index des noms communs

A

antisémitisme, 19

B

bibliothèque, 19, 25, 65, 91, 109

biologie, xvi, 97, 108, 110

Brookhaven, 3, 4, 8–10, 12, 35, 37, 48, 50, 51, 62, 79, 86, 99, 108, 109, 134

budget, 50, 59, 60, 63, 64, 114, 121, 123, 124, 127–130, 134

C

CEA, 4, 7, 11, 17–20, 30, 56, 58, 60, 66, 101, 121, 132

CENG, 6, 7, 30, 32, 58, 61, 63, 66, 69, 71, 80, 86, 89, 101, 105

CERN, xiii, 9, 58, 107, 132

CNRS, 7, 11, 30–32, 56, 58, 63, 66, 89, 101, 105, 132

cœur, 4, 12, 76, 78

collège, 28, 63, 64, 112, 113, 128

comité de direction, 18, 51, 58, 59, 61, 74, 91, 92, 97, 102–104, 116, 122, 124, 128, 133

comité directeur, 66, 123

conduits, 85

conduits de neutrons, 62, 80

conférence de Genève, 12, 13, 47

conseil scientifique, 54, 58, 59, 64, 96, 104, 114, 116, 128

D

de Gaulle, 13, 131

détecteur, 34, 35, 71, 88, 99

deutérium, 34, 37, 49, 80, 82, 110, 136

deutérium liquide, 6, 10

diffraction, 2, 3, 29, 35, 37, 38, 54, 67, 70, 71, 108

diffractomètre, 3, 65, 69, 70, 72, 86, 87, 99, 125

diffusion inélastique, 6, 37, 39, 42–44, 54, 65, 67, 71, 136

E

eau lourde, 2, 4, 5, 13, 34, 48–51, 57, 78, 79, 110, 117, 136

écho de spin, 44, 99

EMBL, 58, 102, 110, 132

ESRF, 21, 30, 32, 91, 108, 132, 137

Euratom, xv, 4, 14

F

fission, 1, 15, 23, 44, 49, 50

flux de neutrons, 3

flux de neutrons thermiques, 4, 49

G

Garching, 7, 53, 63, 135

GFK, 58, 101

graphite, 2, 3, 5, 7, 13, 20, 34, 79

guide, 68, 71, 84, 127

guide de neutrons, 7, 40, 70, 71, 82, 85, 100, 101

guide de neutrons thermiques, 69

H

Harwell, 9, 10

hydrogène liquide, 6, 10, 81, 82

I

informatique, 85, 87, 113

investissement, 10, 45, 103, 116, 134

isotopes, 36

J

juifs, 19, 22

juive, 131, 132

Jülich, 6, 7, 48, 67, 68, 71, 88, 128, 101, 132

K

Karlsruhe, 6, 7, 48, 55, 68, 71, 82, 86, 128

L

longueur d'onde, 2, 6, 10, 34, 36, 39, 84

M

masse critique, 13, 49

matière condensée, 8, 33, 39

modérateur, 2, 5, 20

moment magnétique, 2, 3, 37, 41

monochromateur, 39, 69, 70–72, 98, 100

multidétecteur, 69

- N**
- neutrons froids, 36, 68
 neutrons polarisés, 35, 40, 70, 100, 116, 136
 neutrons thermiques, 2, 36, 67, 68, 85
 neutrons ultra-froids, 116, 135
 Nobel, 3, 22, 23, 37, 57, 80, 96, 106, 107
- O**
- Oak Ridge, 2, 3, 53, 62, 76, 134
 OCDE, 9, 13, 20
 optique des neutrons, 24, 84, 99
- P**
- physique nucléaire, xvi, 5, 33, 44, 54, 63, 67, 87, 90, 97, 107
 physique théorique, 19, 32, 62, 65, 96
 pile piscine, 12, 24, 48, 50, 53
 pile pulsée, 4, 13–15
- polarisés, 36, 41
 prix Nobel, 22, 28, 37, 39
 protéine, 37, 38, 45, 70, 109, 136
- R**
- rayons X, 2, 21, 30, 33, 35, 37, 44, 89, 106, 108–110, 137
 réacteur, 2–5, 6, 7, 20, 24, 30, 48, 52, 63, 72, 79, 84, 85, 95
 réacteur à haut flux, 9–12, 14, 15, 18, 45, 70, 100
 réacteur pulsé, 14, 48
 réactivité, 49
 réflecteur, 4, 14, 34, 49, 50, 81, 82, 119
- S**
- Saclay, 6, 12, 13, 18, 48, 54, 57, 61, 65, 66, 68, 71, 72, 86, 89
 section efficace, 3, 5, 34, 36, 49, 84
 SERC, 35, 124
 source chaude, 10, 62, 68, 70, 82, 95, 116
- source froide, 6, 10–12, 42, 62, 71, 80, 82, 85, 89, 95, 115–117, 135, 137
 spectromètre, 3, 39, 40, 44, 67, 68, 114
 spectrométrie, 6
 spin, 35, 40, 41, 43
 SRC, 101, 103, 124
 structure magnétique, 2, 6, 37, 45, 69, 110, 136
 supermiroir, 43, 100
 sûreté, 133
- T**
- théorie, 63
 théoriques, 135
 trois axes, 39, 40, 44, 68, 69, 86, 113, 114, 125
- U**
- uranium, 1–3, 5, 23, 49, 117
 uranium enrichi, 12, 20, 78, 126
 uranium très enrichi, 12