



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.

Extrait de la publication



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'essayerai 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.

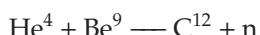
L'ILL étant un institut scientifique, il n'est pas possible d'en parler sans un minimum d'explications sur les recherches qui y sont entreprises. Comme ces recherches portent sur un grand nombre de domaines scientifiques, allant de la physique nucléaire à la biologie, j'essayerai de faire comprendre 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.

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
- R**
- polarisés, 36, 41
 - prix Nobel, 22, 28, 37, 39
 - protéine, 37, 38, 45, 70, 109, 136
- S**
- 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
 - 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