

Des **neutrons** pour explorer la **matière**

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

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

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



Félix Torres Éditeur
Éditions Public Histoire

Des neutrons pour explorer la matière

Denis Mazzucchetti

Denis Mazzucchetti

Des **neutrons** pour explorer la **matière**

Orphée,
réacteur de recherche
à Saclay

Félix Torres Éditeur
Éditions Public Histoire

Des
neutrons
pour explorer
la matière

Réalisation

Félix Torres Éditeur / Éditions Public Histoire,
51, rue du Maréchal de Lattre de Tassigny
91450 Soisy-sur-Seine
Tél. : 01 60 75 85 61
www.public-histoire.com

Direction éditoriale

Boris Dänzer-Kantof

Recherche et rédaction

Denis Mazzucchetti,
avec la participation d'Alain Borderie

Iconographie

Boris Dänzer-Kantof

Direction de publication

Xavier Bravo (CEA), Philippe Mangin (CNRS)

Chefs de projet

Franck Pillot, Alain Menelle

Conception graphique

Florence Cailly / Studio Chine

Réalisation

Émilie Boismoreau / Studio Chine

Photogravure

Planète Graphique

Des neutrons pour explorer la matière

Orphée,
réacteur de recherche
à Saclay

Félix Torres Éditeur
Éditions Public Histoire

Avant-propos

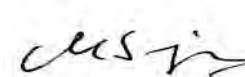
La politique française d'équipement en sources de neutrons menée conjointement par le CNRS et le CEA a permis de garantir à nos chercheurs l'accès à des outils de grande qualité que sont, la source nationale Orphée à Saclay près de Paris, et le RHF géré par un institut européen à Grenoble. À l'instar du rayonnement synchrotron délivré par SOLEIL, les neutrons constituent un outil essentiel d'analyse fine de la matière à des échelles qui vont de l'atome au micron. Ils donnent accès aussi bien à la structure de la matière qu'à sa dynamique ou à son magnétisme.

Le Laboratoire Léon Brillouin (LLB), unité mixte de recherche CEA-CNRS développant une recherche propre et créée en 1974, met à la disposition de la communauté nationale et internationale la vingtaine d'instruments dont dispose le réacteur Orphée. Tous les domaines scientifiques abordés par les neutrons, ainsi que toutes les familles d'appareillages sont représentés ici. Depuis la divergence d'Orphée, en 1980, cette installation bénéficie d'améliorations continues qui en font encore aujourd'hui l'un des meilleurs réacteurs à flux moyen du monde. Elle accueille chaque année près de 500 chercheurs français venus de laboratoires répartis sur tout le territoire national. Avec ses équipements au meilleur niveau mondial, elle leur permet à tous de mener une recherche fondamentale ou technologique de très grande qualité qui sera, à n'en pas douter, une des clés de notre développement futur.

Ce livre est une porte ouverte sur un Très Grand Équipement de la recherche scientifique française que nous vous invitons à parcourir.

Michel SPIRO

Directeur de l'Institut national
de Physique nucléaire
et de Physique des Particules
(IN2P3) du CNRS



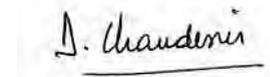
Bertrand GIRARD

Directeur scientifique
du département Mathématiques,
Physique, Planète et Univers
(MPPU) du CNRS



Dominique CHANDESRIS

Directeur scientifique adjoint
du département MPPU du CNRS,
Chargée de la Matière condensée
et des Nanosciences



Préfaces

Ce livre est l'histoire d'une réalisation du nucléaire français. Cette réalisation s'est effectuée sur le centre CEA de Saclay, dans le sud de la région parisienne, l'un des berceaux historiques de la technologie nucléaire française.

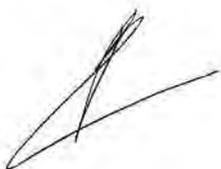
Elle consacre la rencontre d'une discipline scientifique qui était alors en plein essor, la neutronique (à savoir, l'étude des neutrons en interaction avec la matière), avec une technologie qui était alors arrivée à maturité, celle des réacteurs nucléaires expérimentaux (exploités comme sources de neutrons). Cette rencontre s'est effectuée dans la décennie 1970 alors que la France engageait au niveau industriel son programme électronucléaire. Cette rencontre a associé, et associe toujours, le CEA et le CNRS autour d'une installation à vocation scientifique. La nouvelle installation, nommée Orphée, a divergé à la fin de l'année 1980.

C'était hier. C'est aujourd'hui. Le réacteur Orphée est né comme le brillant second d'un réacteur international basé à Grenoble, le réacteur RHF de l'Institut Laue Langevin. Maintenu à un très bon niveau et sans cesse modernisé au niveau de son équipement scientifique, le réacteur Orphée reste aujourd'hui, sur le plateau de Saclay, une installation de référence pour les programmes d'investigations par les neutrons (l'installation traite environ la moitié des besoins français et est fortement ouverte à l'international en accueillant plusieurs centaines de visiteurs scientifiques par an).

Cette histoire se lit également comme une formidable aventure humaine dans laquelle se sont relayés des techniciens, des ingénieurs, des chercheurs, en tant que concepteurs, puis exploitants et expérimentateurs. Le maître mot a été une exigence d'excellence technique et scientifique autour d'un outil à la fois jeune et pérenne, de très bonne conception initiale, et qui continue de confirmer chaque jour sa capacité à accompagner au fur et à mesure les applications scientifiques des neutrons.

Philippe PRADEL

Directeur de l'Énergie nucléaire du CEA



La spectrométrie neutronique est apparue aux États Unis à la fin de la deuxième guerre mondiale et s'est très vite révélée comme un puissant moyen d'investigation de matière condensée.

En France, cette technique a été tout d'abord mise au point sur des réacteurs du CEA : EL3 à Saclay, puis Mélusine et Siloé à Grenoble. Et c'est justement à Grenoble qu'en 1970 est constitué un organisme d'ampleur européenne entièrement dédié à la spectroscopie neutronique, l'Institut Laue Langevin. Son Réacteur à Haut Flux (RHF), lui permet encore à nos jours d'être la référence mondiale dans ce domaine.

L'affirmation de plus en plus forte de la diffusion neutronique comme outil incontournable dans plusieurs domaines scientifiques et technologiques, furent à l'origine de la décision de construire à Saclay une source nationale, le réacteur Orphée. Le Laboratoire Léon Brillouin, commun au CEA et au CNRS, s'élèvera vite parmi les meilleurs laboratoires mondiaux, position qu'il maintient grâce aux qualités de sa source de neutrons, dans une compétition internationale de plus en plus vive.

Après plus de vingt cinq ans d'existence du LLB, cet ouvrage est l'occasion de faire un point sur les recherches, les moyens et les techniques expérimentales dont dispose aujourd'hui le LLB et qui en font la référence française de la communauté neutronique. On y découvre également l'intimité du fonctionnement et de l'exploitation au quotidien de l'installation Orphée, dédiée à la production de neutrons pour la recherche.

Aujourd'hui, le réacteur Orphée et le LLB se situent dans un contexte mondial qui compte plusieurs sites exceptionnels pour l'exploration de la matière, en couplant des sources de neutrons et des sources de rayonnement synchrotron comme par exemple les pôles ILL / ESRF à Grenoble, ISIS / Diamond à Oxford. La présence sur le plateau de Saclay du synchrotron Soleil et d'Orphée permet de rivaliser avec les meilleurs centres européens, tout en garantissant un environnement scientifique d'exception.

Le jeune âge du réacteur, servi par une équipe qui a su s'investir pour le faire fonctionner au mieux de ses capacités et dans d'excellentes conditions de sûreté, est une garantie pour le futur. L'excellence scientifique et l'instrumentation du Laboratoire Léon Brillouin, nous assurent que cet ensemble a le potentiel pour rester au premier plan de la recherche mondiale pendant encore de nombreuses années. Je vous laisse maintenant ouvrir ce livre et revivre ou découvrir ces recherches auprès des scientifiques qui utilisent le neutron au quotidien à Saclay dans l'enceinte du réacteur Orphée.

Yves CARISTAN

Directeur du Centre de Saclay
Directeur des Sciences de la Matière du CEA





Sommaire

Le neutron, explorateur de la matière	10
Aux sources des neutrons, le réacteur Orphée	26
Les aventuriers de la matière : le Laboratoire Léon Brillouin	64
Les neutrons, à l'horizon de la recherche	100



Le neutron, explorateur de la matière

Les mystères de la matière

De la matière à l'atome

« La matière n'est pas un être, mais elle est ce de quoi et en quoi est fait un être » (Théodore de Régnon (1831-1893), *La Métaphysique des causes*). Pour dire la réalité tangible du monde qui les entoure, les hommes ont élaboré le concept de « matière ». Qu'est-ce que la matière ? De quoi est-elle faite ? Comment la manipuler, l'utiliser, la façonner, la transformer, l'améliorer ? Comment adapter ses propriétés physiques à nos besoins ? Si ces questions taraudent depuis toujours l'humanité, les réponses apportées ont largement varié suivant les époques et les civilisations.

Aujourd'hui, la matière est communément définie par le dictionnaire comme « substance qui constitue les corps, qui est objet d'intuition dans l'espace et possède une masse mécanique » (*Le Robert*). Elle peut prendre plusieurs états, ou *phases*, dont les plus communes sont l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Mais il en existe d'autres, comme le plasma ou les états intermédiaires de la matière molle, cristal liquide, matière biologique... la liste est loin d'être close ! La matière est une notion complexe qui a fait l'objet de multiples tentatives de description au cours de l'histoire. Dès le ^{ve} siècle av. J.-C., les philosophes grecs Leucippe et Démocrite postulèrent un dénominateur commun : l'atome, « ce qui ne peut être divisé », unité de base de la matière qui



Démocrite d'Abdère (v. 460 – v. 360), représenté sur un billet grec de 100 drachmes datant des années 1960. Disciple de Leucippe, Démocrite élabore avec son maître la théorie dite atomiste, une spéculation

intellectuelle sur l'engendrement du monde qui reconnaissait pour la première fois l'existence du vide – et qui sera supplantée des siècles durant par la conception vitaliste et continue de la matière.

La matière est faite de... bois !

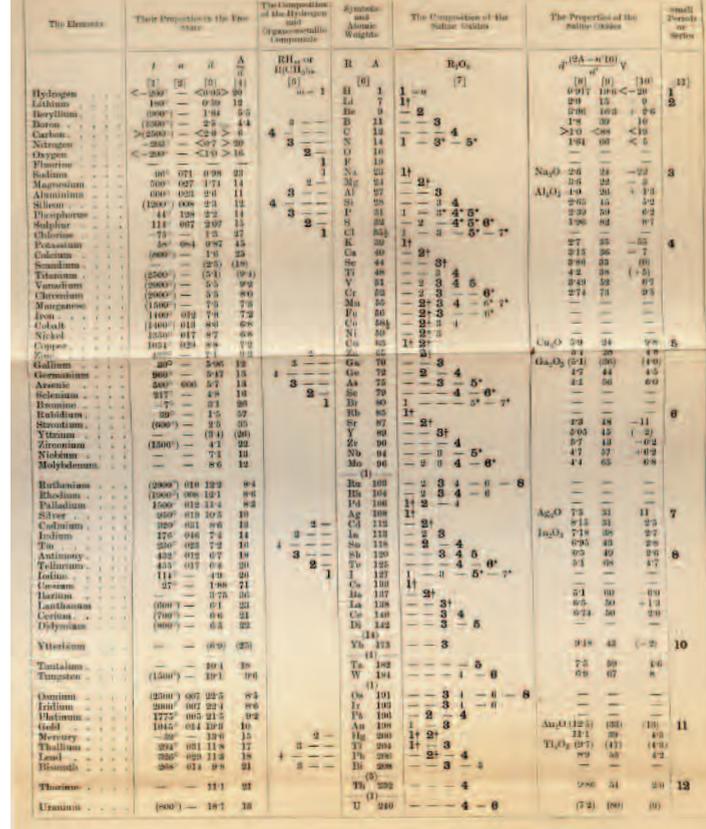
Il s'agit bien entendu de son essence linguistique ! En latin, *materia* désignait la substance dont est faite la *mater*, le tronc de l'arbre qui, telle une « mère », engendre les branches. Cette partie de l'arbre fournissait le « bois de construction » ; elle a fini par désigner, par extension, tout matériau de construction, puis tout « matière »...

serait invisible, impérissable, illimitée et en mouvement perpétuel. Toutefois, il faudra plus de 2 000 ans de controverses pour que la notion de matière prenne corps sur des bases scientifiques. La théorie atomique moderne date du début du XIX^e siècle ; elle découle des progrès de la mécanique newtonienne et de la science chimique. En 1803, le savant anglais John Dalton émet l'hypothèse selon laquelle chaque élément serait composé d'atomes identiques restant inchangés durant les transformations chimiques. On met en évidence l'existence d'une centaine d'éléments, ou corps simples, constituant les briques élémentaires de la matière. *L'atome* se trouve ainsi défini comme la plus petite partie d'un corps simple pouvant se combiner avec d'autres, pour former des *molécules* ou d'autres structures complexes.

Le monde atomique

C'est en 1897 que le physicien britannique Joseph John Thomson découvre que les atomes comportent des éléments encore plus petits : les électrons. En 1911, son compatriote Ernest Rutherford révèle expérimentalement l'existence du noyau atomique, qui concentre presque toute la masse de l'atome sur un diamètre cent mille fois plus petit que l'atome lui-même. Bref, loin d'être « indivisible », l'atome s'avère être un assemblage de particules, un « fourmillement prodigieux de mondes nouveaux » pour reprendre l'expression du savant français Jean Perrin (1870-1942) ! Pour les physiciens, l'enjeu est désormais d'élaborer le modèle susceptible d'en décrire la structure interne...

Le plus pertinent de ces modèles est proposé en 1913 par Niels Bohr. Le physicien danois reprend une hypothèse de Rutherford selon laquelle l'atome s'apparenterait au système solaire : telles les planètes, les électrons graviteraient autour du noyau atomique – la force régissant leur mouvement n'étant plus la force d'attraction des masses mais la force électrique entre le noyau chargé positivement et les électrons négativement. Bohr suppose en outre que les petites particules obéissent à des lois différentes de celles qui régissent les corps planétaires.



La première édition anglaise (1891) des *Principes de la Chimie* est traduite de la cinquième édition russe.

En haut : Dimitri Mendeleïev dans son cabinet de travail.



LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

En 1869, le scientifique russe Dimitri Mendeleïev observe que les propriétés chimiques des éléments sont fonctions périodiques de leur masse atomique. Aussi propose-t-il de les classer en les numérotant dans un tableau respectant cette périodicité. On trouve en numéro 1 l'hydrogène symbolisé par la lettre H, en 2 l'hélium (He), en 8 l'oxygène (O), en 26 le fer (Fe), en 92 l'uranium (U)...



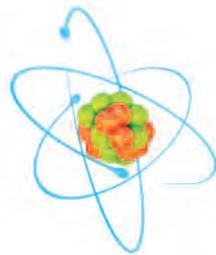
1. Professeur à Manchester, John Dalton (1766-1844) postule l'existence des atomes afin de désigner le poids résiduel d'une substance entrant dans une combinaison chimique ; on pourrait induire ce « poids atomique » de la proportion des composants dans un composé puis dresser des tables des éléments suivant leur poids atomique relatif – l'atome d'hydrogène, réputé le plus léger, fournissant l'unité de référence. Ses idées déboucheront sur la distinction entre atome et molécule.

2. Joseph John Thomson et son ancien élève Ernest Rutherford (1871-1937). Après la découverte de la particule élémentaire d'électricité, le terme « électron » fut long à s'imposer – Thomson lui-même préférant employer celui de « corpuscule » ! Les travaux de Rutherford sur la radioactivité (qui lui valurent le prix Nobel de chimie en 1908) contribuèrent grandement à valider les idées de Thomson (prix Nobel en 1906).



Niels Bohr et Albert Einstein en 1925, photographiés par Paul Ehrenfest. S'ils furent tous deux à l'origine de la découverte des phénomènes quantiques, les deux savants s'opposèrent rapidement sur la portée de cette révolution scientifique. Contre Bohr qui voyait dans la mécanique quantique une description complète de la réalité physique, Einstein

refusa d'abandonner complètement le modèle classique. « Dieu ne joue pas aux dés ! » lui répondit-il dans une célèbre lettre écrite le 4 décembre 1926.

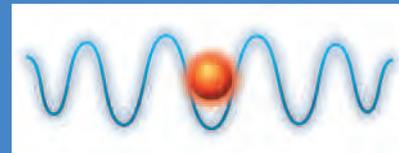
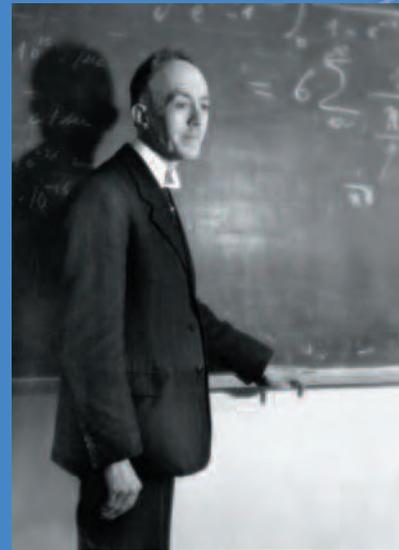


Un atome

Cette représentation de l'atome reprend le modèle de Bohr : les électrons gravitent sur des orbites tout autour du noyau. Dans des modèles plus élaborés, les orbites sont remplacées par des zones de probabilité de présence : il est en effet impossible de déterminer la position exacte du cortège électronique.

Les électrons en orbite dans l'atome occuperaient ainsi des niveaux discrets d'énergie obéissant à des règles de quantification. Ce modèle permet d'expliquer les observations d'émission de particules lumineuses induite par les changements de niveau des électrons dans les atomes.

Le postulat par Louis de Broglie en 1923 de la nature ondulatoire des particules conforte ce modèle. Des lois radicalement nouvelles sont énoncées dans les années suivantes pour décrire le mouvement de ces petites particules n'obéissant pas à la mécanique newtonienne, mais à ce qui va être appelé la *mécanique quantique*. Il faut, en chemin, remplacer l'approche déterministe classique par une approche probabiliste et abandonner toute velléité d'une représentation analogique ou même visuelle du monde atomique.



Tout comme la lumière peut se comporter comme une particule, les particules de la matière peuvent avoir les propriétés des ondes : telle est l'idée révolutionnaire présentée en 1923 par le physicien français Louis de Broglie. Il postule qu'à chaque particule est associée une onde. Dans le cas des particules possédant une masse, ce qui est le cas du neutron, la longueur d'onde est déterminée par la masse et la vitesse de la particule. Plus les valeurs de ces dernières sont grandes, plus courte est la longueur d'onde. Les caractéristiques corpusculaires d'une particule sont sa masse m et sa vitesse v ; sa caractéristique ondulatoire est donnée par sa longueur d'onde λ . Les grandeurs m , v et λ sont liées par une relation simple :

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

où h est une constante universelle appelée « constante de Planck. » Cette loi sera par la suite vérifiée expérimentalement et constituera un des fondements de la mécanique quantique.

Les composants de l'atome

Après avoir découvert l'électron, les physiciens vont mettre en évidence les composants du noyau : le proton, tout d'abord, porteur d'une charge électrique élémentaire positive opposée à celle que porte l'électron négatif, découvert en 1919 par Rutherford ; puis, en 1932, le neutron – qui, comme son nom l'indique, ne porte aucune charge. La neutralité électrique globale de l'atome se trouve assurée par l'égalité du nombre des électrons en orbite et des protons du noyau.

Le modèle initial de Bohr ne faisait pas état des neutrons. En effet, électriquement neutres, ceux-ci n'affectent pas la force qui régit le mouvement des électrons, ne modifient pas les niveaux d'énergie occupés par les électrons et en conséquence ne perturbent pas la position des raies du spectre d'émission de lumière. La découverte des neutrons découle de celle du proton, dont le nombre est insuffisant pour expliquer la masse

du noyau. Dans un premier temps, pour rendre compte de ce défaut de masse, Rutherford proposa d'ajouter au noyau de nouveaux protons neutralisés par autant d'électrons. Ces paires « proton-électron », qui auraient pour effet d'accroître la masse du noyau sans en modifier sa charge, furent baptisées « neutrons » en 1921 par le chimiste américain William D. Harkins (le terme avait déjà été employé en 1903 par le chimiste allemand Walther Nernst pour désigner une hypothétique molécule électriquement neutre et sans masse). Cette hypothèse rendait cependant difficilement compte de la stabilité de la structure du noyau et, surtout, personne n'arrivait à prouver expérimentalement l'existence de cet insaisissable « neutron ».

En 1928, le physicien allemand Walter Bothe et son étudiant Herbert Becker observent que le bombardement de béryllium par une particule α provoque un rayonnement très pénétrant, donc

LA DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

Certains noyaux que l'on trouve dans la nature ne sont pas stables et se transforment au cours du temps. Ce phénomène fut découvert fortuitement le 1er mars 1896 par le physicien français Henri Becquerel : des plaques photographiques vierges qu'il avait laissées au voisinage d'un sel d'uranium avaient été noircies par un rayonnement inconnu, que l'on appela « radiation radioactive ». Becquerel vérifia par la suite que l'uranium émettait de façon continue de tels rayonnements, puis Pierre et Marie Curie isolèrent deux autres éléments radioactifs, jusqu'alors inconnus : le polonium et le radium.

On distingue trois types de radioactivité :

- les émissions de particules alpha (α), massives et portant deux charges positives ; elles sont constituées de groupes de deux protons et deux neutrons, c'est-à-dire de noyaux d'hélium ;

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

La découverte des deux composants du noyau de l'atome, proton et neutron, a déplacé la question de l'insécabilité vers ces nouveaux venus : sont-ils ou non composés de particules plus petites ? Progressivement, on découvrit de nouvelles particules : le positron, le neutrino, le muon, le pion, etc., et peu à peu, se posa la question d'une classification des particules, sur le modèle de la classification des éléments. C'est ainsi qu'a été élaboré le « modèle standard », socle théorique actuellement utilisé pour expliquer les phénomènes observables à l'échelle des particules.

- les émissions de particules bêta (β), particules de faible masse dotées d'une charge négative ; ce sont des électrons ;
- les rayonnements gamma (γ) ne portent ni charge électrique ni masse ; ils sont constitués d'ondes électromagnétiques de très courte longueur d'onde. Les particules associées à ces ondes sont appelées « photons ».

Chaque émission de rayonnement α ou β modifie la composition du noyau de l'élément et le transforme en un noyau d'un autre élément : c'est le phénomène de « transmutation », accompagné du processus de « désintégration » atomique. Par exemple, l'uranium se transforme en thorium par désintégration alpha.

La découverte de la radioactivité naturelle fit faire un bond à la recherche atomique : d'une part, en étudiant les radiations émises, on put avancer dans la compréhension de ce qui se passait dans le noyau ; d'autre part, on se servit de ces rayonnements pour bombarder des cibles nucléaires. Cela permit, entre autres choses, la découverte de la radioactivité artificielle puis celle du neutron.

Le physicien américain Murray Gell-Mann a notamment montré en 1964 que les neutrons et les protons sont composés de trois particules élémentaires, appelées quarks. Les quarks sont liés par une interaction, appelée « interaction forte », dont les particules d'échange sont les gluons. Cette interaction est également responsable de la stabilité du noyau atomique. Le neutron comporte 1 quark « up » (u) et 2 quarks « down » (d). On a depuis identifié 6 quarks de « saveurs » différentes.

LES CARACTÉRISTIQUES DU NEUTRON

Les particules sont définies par un petit nombre de caractéristiques de base dont les principales sont la masse au repos, la charge électrique et le « spin ». Le spin est une propriété purement quantique, que l'on peut rapprocher d'un moment cinétique intrinsèque d'une particule – comme si celle-ci tournait

autour de son axe (en anglais, *to spin* signifie « tourner »). Il ne peut prendre que des valeurs entières ou demi-entières (0, $\frac{1}{2}$, 1, etc.). Au spin est associé un moment magnétique qui fait de la particule ou de l'atome qui le porte un aimant microscopique.

	Neutron	Proton	Électron
Masse au repos	$1,675 \times 10^{-27}$ kg	$1,673 \times 10^{-27}$ kg	$9,109 \times 10^{-31}$ Kg
Charge électrique	0 Coulombs	$1,602 \times 10^{-19}$ C	$-1,602 \times 10^{-19}$ C
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Moment magnétique	$-0,96 \times 10^{-26}$ joules par tesla	$1,411 \times 10^{-26}$ J/T	$-928,5 \times 10^{-26}$ J/T

non chargé, qu'ils interprètent comme un rayonnement électromagnétique γ . Quatre ans plus tard, Irène Joliot-Curie et son mari Frédéric Joliot montrent que le rayonnement de Bothe et Becker, dirigé sur un bloc de paraffine, éjecte des protons. Ils ne remettent cependant pas en cause les conclusions antérieures et interprètent leur expérience par un effet photoélectrique protonique : le rayonnement γ éjecterait des protons au lieu d'électrons comme dans l'effet photoélectrique. Rutherford ne croit pas à cette interprétation et son ancien élève James Chadwick, devenu son collègue au laboratoire Cavendish à Cambridge, montre en 1932, en bombardant des cibles de différentes nature (hélium, azote...), que les énergies de recul ne sont explicables que si le projectile supposé être un photon γ est en fait une autre particule, de masse égale à celle du proton. C'est la découverte de la seconde particule constituant le noyau ; on lui conserve le nom de « neutron ».

Le neutron

La découverte du neutron eut un impact décisif sur la physique nucléaire, en raison notamment des propriétés de la particule.



James Chadwick (1891-1974). Le neutron de Chadwick est une particule de masse 1 et de charge nulle, composée, suivant le modèle proposé par Rutherford à la conférence Baker de 1920, d'un proton et d'un électron.

Neutrons et atomes : l'isotopie

La découverte du proton par Ernest Rutherford en 1919 donna une nouvelle dimension aux travaux de Mendeleïev (voir p. 13) en faisant correspondre le numéro d'ordre de chaque élément dans le tableau périodique à son numéro atomique Z, nombre de protons du noyau. On découvrit aussi que, pour un même élément chimique, le nombre de neutrons peut varier. Dans le cas du fer, par exemple, on trouve des noyaux à 28, 30, 31 et 32 neutrons pour un même nombre de 26 protons – sinon ce ne serait plus du fer ! Ces différents noyaux ou nucléides sont



Contrairement aux glaçons usuels (verre de droite), les glaçons fabriqués avec de l'eau lourde tombent au fond d'un verre d'eau ordinaire (verre de gauche).

appelés noyaux isotopiques ou isotopes de fer. Chaque atome est repéré par son numéro atomique Z (nombre de protons) et son nombre de masse A (nombre de nucléons, c'est-à-dire de protons et de neutrons, du noyau). Le nombre de neutrons N est égal à $A-Z$. Ainsi le noyau de (fer 54), qui contient 26 protons et 28 neutrons, est-il noté symboliquement $^{54}_{26}\text{Fe}$, et celui de (fer 56), composé de 26 protons et 30 neutrons, $^{56}_{26}\text{Fe}$. Les corps qui nous entourent sont en général des mélanges d'isotopes dans des proportions bien définies : le fer naturel comporte 5,8 % de $^{54}_{26}\text{Fe}$, 91,72 % de $^{56}_{26}\text{Fe}$, 2,2 % $^{57}_{26}\text{Fe}$ et 0,28 % $^{58}_{26}\text{Fe}$. Dans le domaine des réacteurs nucléaires, une application de l'isotopie est l'eau lourde (D_2O), chimiquement identique à l'eau habituelle dite « légère » (H_2O), mais dont les atomes d'hydrogène ($\text{H} = {}^1_1\text{H}$) ont été remplacés par un de ses isotopes, le deutérium ($\text{D} = {}^2_1\text{H}$), qui comprend un neutron de plus.

Frédéric Joliot (1900-1958) et Irène Curie (1897-1956) dans leur laboratoire. Un an après avoir laissé passer la découverte du neutron, le couple français fabrique du phosphore radioactif, en bombardant une feuille d'aluminium avec des particules alpha ; c'est la découverte de la radioactivité artificielle pour laquelle ils recevront le prix Nobel de chimie en 1935.

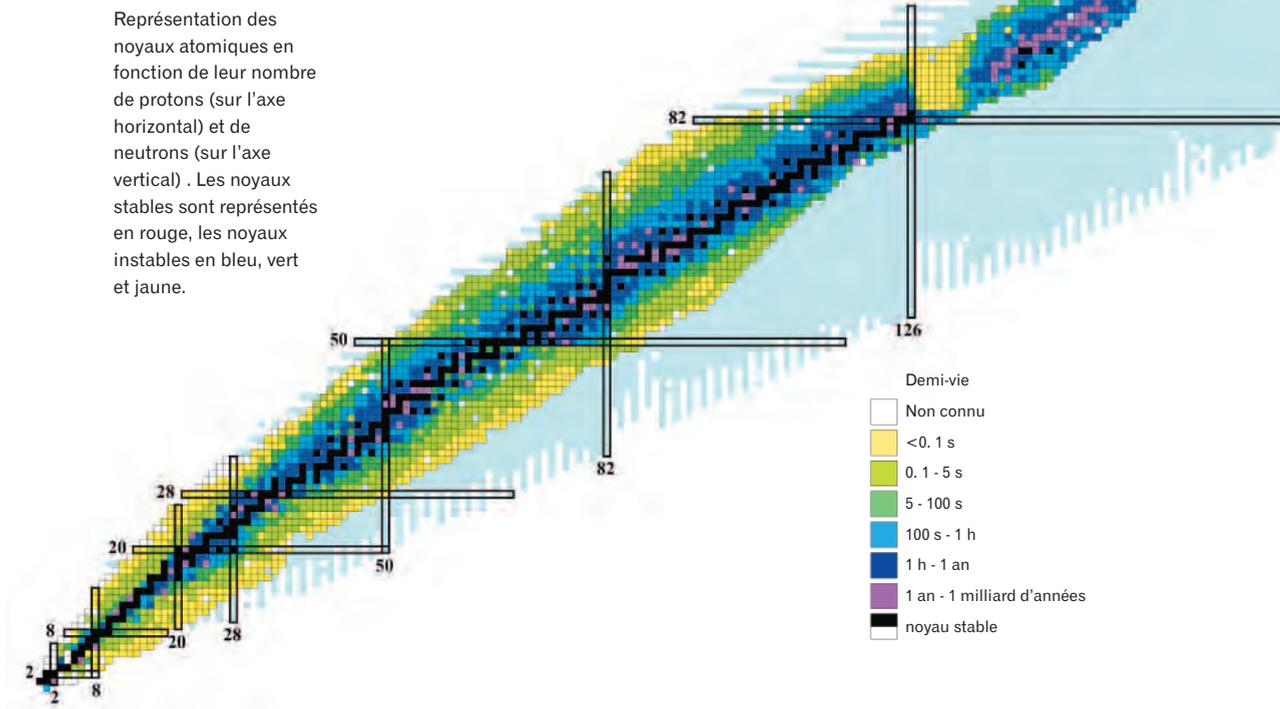


L'eau lourde est principalement utilisée pour ralentir (ou « modérer ») les neutrons dans certaines filières de réacteurs nucléaires (voir chapitre II). Il existe aussi quelques applications de l'eau lourde en spectroscopie par Résonance Magnétique Nucléaire.

Le rapport entre le nombre de protons et le nombre de neutrons obéit cependant à certaines règles. Au voisinage de la bande de stabilité (voir encadré), il est possible de créer de nouveaux isotopes en bombardant un élément naturel avec des particules alpha, des protons ou des neutrons. Ainsi, c'est en soumettant une feuille d'aluminium à un rayonnement α que Irène Joliot-Curie et Frédéric Joliot synthétisèrent en 1934 un isotope de phosphore jusque-là inconnu ; cet isotope étant lui-même radioactif, ils découvrirent par la même occasion la radioactivité artificielle.

Dans la nature, on dénombre environ 270 nucléides stables et 70 nucléides radioactifs. Depuis la découverte de la radioactivité artificielle, on a produit plus de 1 000 nucléides radioactifs artificiels. Plusieurs dizaines de ces nouveaux noyaux sont encore découverts chaque année dans des installations comme le Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL), exploité conjointement par le CEA et le CNRS.

Représentation des noyaux atomiques en fonction de leur nombre de protons (sur l'axe horizontal) et de neutrons (sur l'axe vertical). Les noyaux stables sont représentés en rouge, les noyaux instables en bleu, vert et jaune.



COMMENT UN NOYAU ATOMIQUE PEUT-IL ÊTRE STABLE ?

Avec des protons chargés positivement et des neutrons sans charge, on pourrait imaginer que le noyau éclate sous l'effet des charges électriques répulsives. Il n'en est rien : protons et neutrons subissent à très courte distance des forces attractives extrêmement intenses, issues de l'« interaction forte ». Celle-ci agit sur les quarks et est portée par les gluons qui « débordent » des protons et neutrons. Cependant, pour des raisons encore mal comprises, les noyaux ne sont stables que pour un rapport donné entre le numéro atomique Z et le nombre de masse A . Ce rapport délimite une « bande de stabilité » : pour un même élément, le nombre de neutrons peut être variable. Il est proche du nombre de protons pour les éléments légers

et devient plus important pour les éléments lourds, ceux dont le numéro atomique Z est supérieur à 20. Les noyaux atomiques dont le rapport A/Z ne correspond pas à la bande de stabilité subissent une désintégration radioactive conduisant à transformer l'élément, soit en un autre isotope stable du même élément, soit en un autre élément chimique. Par exemple, l'uranium 238 présent naturellement dans l'écorce terrestre est radioactif par excès de neutrons. Il rejoint très lentement la stabilité sous forme de plomb 206 en suivant une chaîne de décroissance composée de 15 éléments, tous radioactifs, dont l'uranium 234, le thorium 230, le radium 226 etc.... Certaines de ces étapes peuvent durer plusieurs centaines de milliers d'années !



Un projectile éphémère, mais efficace !

Le neutron possède d'autres caractéristiques importantes. À l'intérieur du noyau, il est stable et a une durée de vie illimitée. En revanche, hors du noyau, et selon une période radioactive de 890 s, un neutron libre se désintègrera spontanément en un proton, un électron et un anti-neutrino...

Pour des temps plus courts, il constitue un projectile exceptionnel pour pénétrer dans la matière, sans être repoussé par sa charge électrique ou celle des électrons. Trois solutions se présentent, suivant la composition de la cible et la vitesse du neutron :

- La « fission ». Le neutron « casse » un noyau lourd (de l'uranium par exemple) en des fragments plus légers tout en libérant une grande quantité d'énergie : les réacteurs nucléaires « à fission » sont basés sur ce processus.

- La « capture ». Le neutron est capturé par le noyau, provoquant une cascade de réactions

Mise en place d'une pièce mécanique à étudier sur un spectromètre de diffusion de neutrons à Orphée.

nucléaires aboutissant à une espèce chimique différente. Dans un réacteur nucléaire, cette réaction est utilisée dans les détecteurs de neutrons ou dans les barres de commandes pour contrôler la réaction en chaîne.

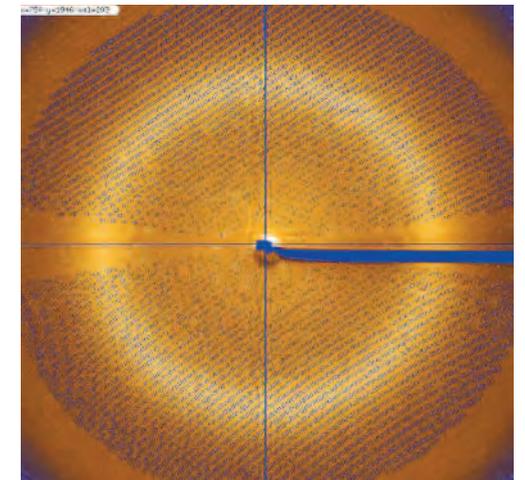
- La « diffusion ». Le neutron quitte la cible après avoir interagi avec le noyau ; il emporte une information sur la position du noyau, son mouvement et le moment magnétique de l'atome, jouant ainsi le rôle d'une véritable sonde subatomique. C'est cette propriété, utilisée au laboratoire Léon Brillouin, qui constitue le sujet de ce livre.

Voir dans la matière

Connaître la position et le mouvement des atomes dans la matière, décrire ce qu'il advient lorsque le matériau fond, expliquer le ramollissement des plastiques, le repliement des protéines, l'apparition ou la disparition d'un phénomène magnétique... : autant de questions posées par la physique, la chimie, la science des matériaux et dont les implications s'avèrent fondamentales pour l'ensemble de la société. Elles permettent d'améliorer les propriétés de matériaux existants, d'élaborer de nouveaux assemblages, de mettre au point de nouvelles technologies, de traiter certaines maladies. Pour cela, il faut déterminer comment sont organisés les atomes et les molécules d'un matériau, mesurer les forces qui les lient et étudier leurs structures électroniques. Comment accéder à ces informations, sachant que les atomes sont trop petits pour être discernés par l'œil humain ? Les physiciens ont progressivement mis au point des techniques décrivant avec une précision croissante ces interactions fondamentales. La diffraction de rayons X (ondes électromagnétiques) par des cristaux a été utilisée dès les années 1910 par Max von Laue et les Bragg père et fils ; cette technique fut par la suite complétée par l'utilisation de faisceaux de photons, d'électrons, puis de neutrons.

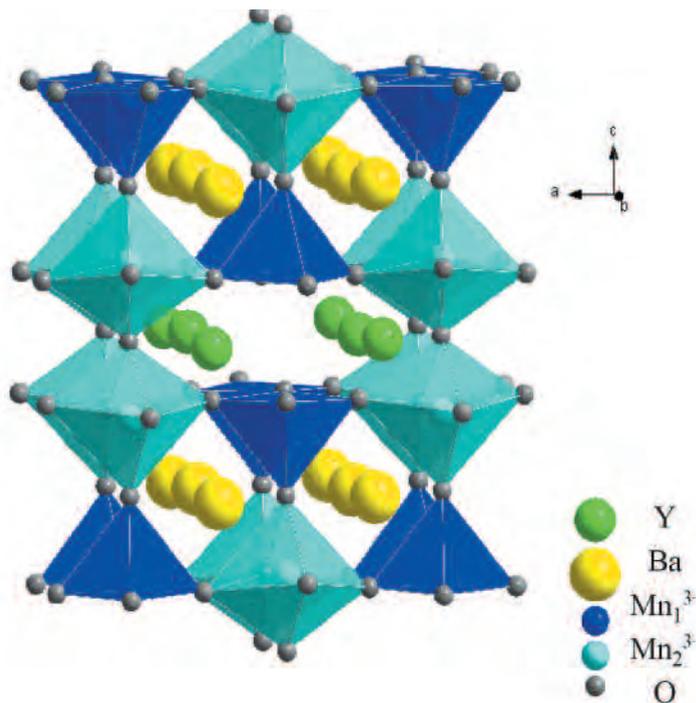
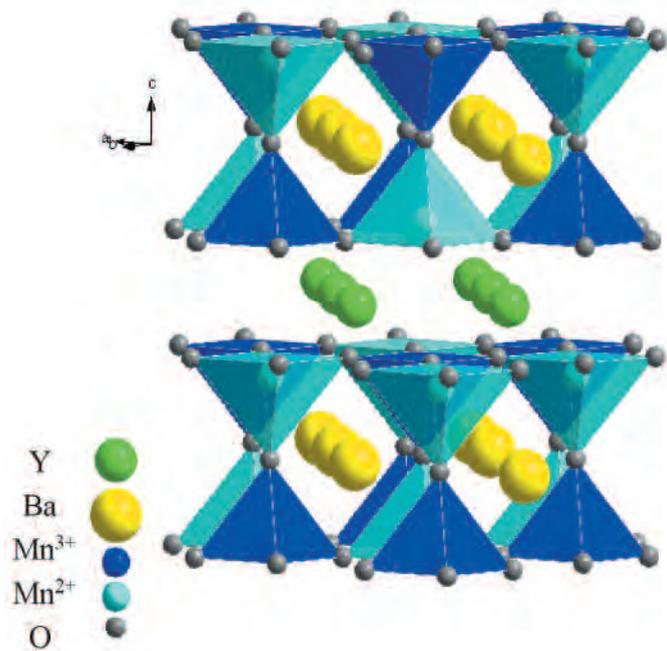
Le rayonnement neutronique

Les faisceaux de neutrons possèdent des propriétés uniques qui en font un outil de choix pour explorer la matière – et plus particulièrement ce que l'on appelle la matière « condensée ». Ne portant pas de charge électrique, les neutrons peuvent interagir directement avec le noyau de l'atome. Ils possèdent ainsi un grand pouvoir de pénétration et peuvent sonder la totalité des atomes d'un échantillon massif. Par ailleurs, les neutrons peuvent « voir » certains atomes légers beaucoup plus facilement que les rayons X ; cela rend notamment possible la localisation de l'hydrogène dans les systèmes biologiques cristallisés et les cristaux moléculaires. Enfin, deux isotopes d'un même élément auront



William Henry (1862-1942) et son fils William Lawrence (1890-1971) Bragg démontrent que les phénomènes de diffraction obéissent à une formule mathématique simple, appelée « loi de Bragg » (voir p. 82). On établira par la suite que cette loi s'applique à tout rayonnement rencontrant un milieu périodique.

Les rayons X diffractés par un cristal de protéine sont recueillis sur un détecteur et forment un diagramme de diffraction qui permet, par une méthode de calcul, d'en déduire la structure tridimensionnelle.



La matière condensée

La matière dite « condensée » se caractérise par le fait que ses constituants (atomes ou molécules) sont très proches et liés les uns aux autres. Elle correspond aux deux phases génériques « denses » : l'état solide et l'état liquide ainsi qu'à toutes les formes de matière intermédiaires dite « matière molle ». Les cristaux, cristaux liquides, solides amorphes, polymères font partie de ses objets d'étude privilégiés.

Représentation de la structure du composé Y Ba Mn₂ O₅. Les volumes représentés font ressortir les positions des atomes d'oxygène à l'origine des propriétés magnétiques particulières de ce matériau (magnétorésistance géante exceptionnelle).

LES MOMENTS MAGNÉTIQUES

Certains solides placés dans un champ magnétique s'aimantent : il sont repoussés ou attirés. Un petit nombre d'atomes, comme le fer, le cobalt, le nickel ou les « terres rares », possèdent une aimantation spontanée et créent autour d'eux un champ magnétique. Ces propriétés sont dues au fait que les atomes possédant un nombre impair d'électrons portent ce que l'on appelle un « moment magnétique ». Ces moments magnétiques interagissent entre eux, donnant naissance à des structures désordonnées (comme dans un système paramagnétique) ou ordonnées. Dans un système ferromagnétique, par exemple, tous les moments magnétiques sont orientés dans la même direction, composant, en additionnant leurs effets, un grand aimant macroscopique. Dans un système antiferromagnétique, les moments s'orientent alternativement dans un sens ou dans l'autre. Il existe bien d'autres cas encore.



Gros plan sur le disque dur d'un ordinateur qui utilise les propriétés magnétiques des atomes pour stocker des informations.

des interactions différentes avec les neutrons : cette propriété est à la base de mesures dites « différentielles », par substitution isotopique (du deutérium et de l'hydrogène par exemple). Les neutrons constituent ainsi une sonde de la matière très complémentaire des rayons X. Atout supplémentaire du neutron : sa masse, qui en fait un instrument parfaitement adapté aux mesures souhaitées, puisqu'elle lui permet de satisfaire, à une vitesse comprise entre 500 et 10 000 mètres par seconde, à deux exigences en même temps :

- une longueur d'onde comparable aux distances

inter-atomiques (entre 0,1 et 20 nm), ce qui permet de mesurer les distances entre les atomes et de déterminer la taille des molécules ;
- une énergie cinétique du même ordre de grandeur que les énergies des mouvements atomiques dans les solides ou les liquides (soit entre 0,1 et 100 meV), ce qui permet d'extraire des informations sur les modes de vibration internes de la matière (les phonons). Enfin, *last but not least*, le neutron, bien que dépourvu de charge électrique, porte un moment magnétique idéal pour déterminer la structure magnétique de la matière.



COMMENT LES NEUTRONS S'Y PRENNENT-ILS POUR « EXPLORER » LA MATIÈRE ?

Lorsqu'il se présente devant l'échantillon à étudier, le neutron joue de sa dualité « onde-corpuscule » et envoie l'onde en « éclairer ». Celle-ci examine tous les chemins de diffusion possibles. Chaque fois qu'elle rencontre un noyau atomique, elle transfère une petite partie de son amplitude à une « ondelette » centrée sur ce dernier. D'atome en atome, apparaissent une multitude d'ondelettes qui se superposent les unes aux autres. Dans certaines directions, ces ondelettes se trouvent en opposition de phase et s'annulent, alors que dans d'autres, elles sont en phase, leurs amplitudes s'additionnent et une onde de

plus grande amplitude émerge. Le neutron quittera l'échantillon dans la même direction que cette onde. Si plusieurs directions sont possibles, le hasard décide !

On observe *in fine* une répartition des neutrons diffusés dans les directions où les ondelettes sont en phase et se renforcent. Lorsque l'échantillon est cristallin, ces directions sont très sélectives : on les appelle « directions de Bragg ». Lorsque l'échantillon est désordonné, comme dans un liquide ou un solide amorphe, les directions sont moins bien définies. Dans tous les cas, elles sont caractéristiques de la structure atomique.



Mise en place d'un échantillon sur un spectromètre à champ magnétique variable pour étudier son aimantation interne.

Avec de telles caractéristiques, on comprend que les rayonnements neutroniques s'avèrent irremplaçables pour localiser les d'atomes légers au milieu d'atomes lourds, analyser des nanomatériaux ou mesurer le magnétisme à l'échelle atomique.

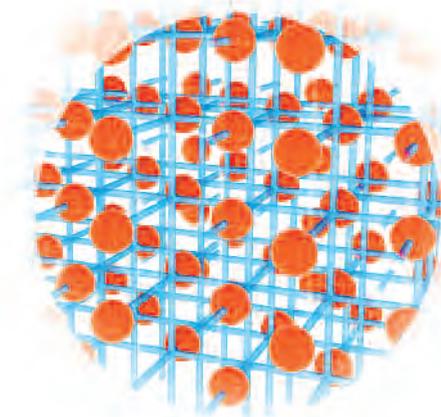
Utiliser les neutrons : la spectroscopie neutronique

En interagissant avec la matière, le neutron peut voir modifiées sa direction de propagation, son énergie et l'orientation de son spin. De l'étude des changements des caractéristiques d'un faisceau, on déduit les propriétés de l'échantillon étudié.

Si tous les neutrons du faisceau incident ont une trajectoire parallèle, la diffusion par l'échantillon donne naissance à des faisceaux secondaires, dont la direction dépend de l'organisation des atomes. Cette « diffraction », ou « diffusion élastique » des neutrons, révèle la nature de l'objet étudié, permet de mesurer les distances entre atomes et, par exemple, de reconstituer l'édifice cristallin.

Toutefois, dans la matière, les atomes bougent : dans les solides, ils vibrent autour de leurs positions d'équilibre ; dans les liquides, ils peuvent se déplacer très loin. Pour mesurer ces mouvements, il faut faire appel à un deuxième phénomène, appelé « diffusion inélastique ». Quand un faisceau de neutrons est diffusé dans un échantillon, il est possible qu'un neutron incident modifie le mouvement d'un atome – comme lorsque les boules d'un jeu de billard s'entrechoquent. En mesurant et en analysant les changements d'énergie du neutron, on peut remonter à la dynamique des atomes, c'est-à-dire étudier leur position et/ou leur orientation en fonction du temps.

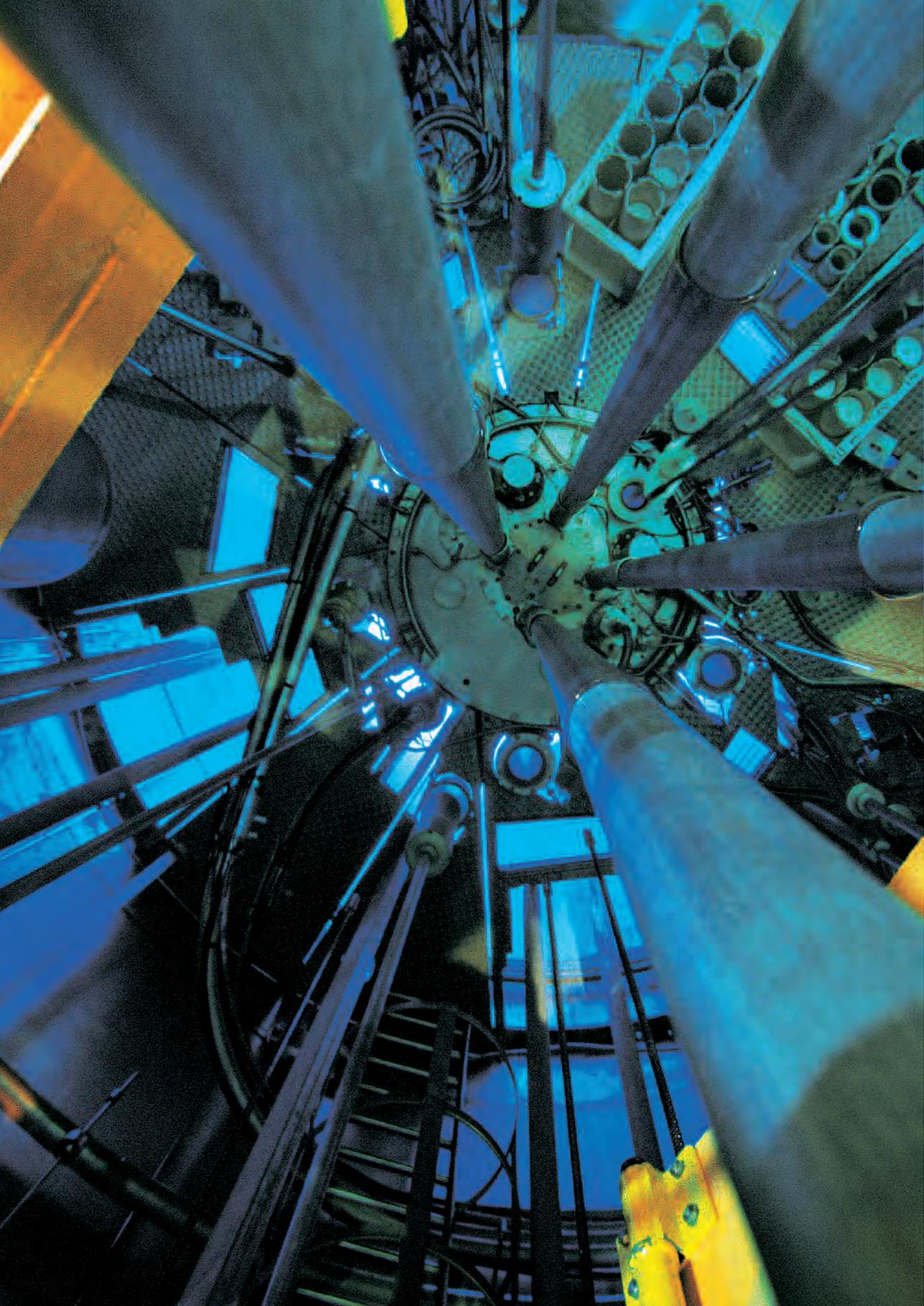
Le troisième phénomène utilisé en spectroscopie neutronique, la diffusion magnétique, renseigne quant à lui sur les caractéristiques magnétiques de l'échantillon. Au cours d'une



On représente souvent les cristaux avec des atomes fixes, alors qu'en réalité ils sont toujours en mouvement autour leur position d'équilibre.

diffusion, les spins des neutrons peuvent en effet interagir avec les moments magnétiques des atomes. On peut ainsi mesurer, par diffraction, la structure magnétique de l'échantillon et, par diffusion inélastique, les excitations magnétiques ; mieux, si l'on prépare un faisceau dont tous les neutrons ont la même direction de spin, on peut même déterminer la densité locale de moment magnétique. C'est à ce jour la seule technique connue susceptible d'offrir un tel degré de précision.

La route est désormais tracée. Il faut produire des neutrons, les préparer dans des états bien définis, les diriger sur la matière, collecter et analyser les neutrons diffusés, en déduire la structure et la dynamique des matériaux. C'est la mission des techniciens et des chercheurs d'Orphée et du LLB.



Aux SOURCES des neutrons, le réacteur Orphée

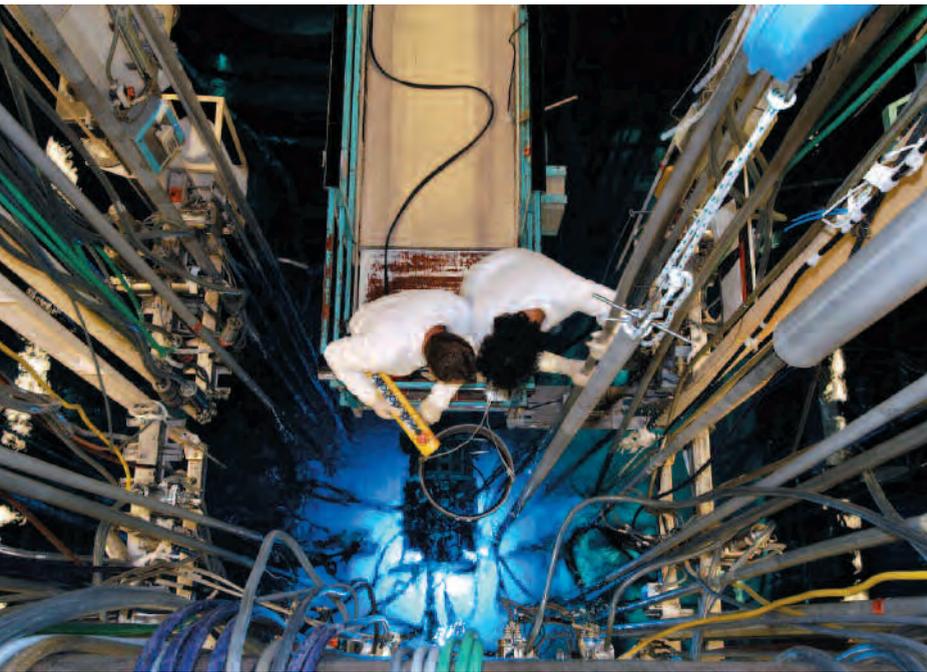
**La production de
neutrons thermiques
dans les réacteurs
de recherche français**

Les réacteurs nucléaires, de la polyvalence à la spécialisation

Comment obtenir ces précieux neutrons ? Les expériences fondatrices de Walter Bothe et Herbert Becker, d'Irène et Frédéric Joliot et de James Chadwick furent réalisées en bombardant du béryllium avec des particules α émises par du polonium. De telles émissions ne peuvent cependant combler les besoins scientifiques. Des flux intenses doivent être générés par des instruments autrement puissants : les réacteurs nucléaires.

Ceux-ci utilisent le principe de la réaction en chaîne, établi par l'équipe de Frédéric Joliot en 1939. La fission d'un noyau atomique lourd provoque l'émission de deux à trois neutrons – le nombre varie en fonction de la nature du combustible ; certains des neutrons libérés peuvent alors aller frapper un autre noyau fissile, qui se cassera à son tour en deux en libérant de l'énergie et de nouveaux neutrons. Un réacteur nucléaire va servir à déclencher puis entretenir cette réaction en chaîne en contrôlant le nombre de neutrons présents dans le « cœur ». Bien que relevant

Le cœur du réacteur
Orphée.



Le réacteur Osiris à Saclay est destiné essentiellement à étudier la tenue des matériaux sous rayonnement.

d'un principe commun, les réacteurs nucléaires n'ont pas tous la même finalité et peuvent différer tant par leur conception que par leur fonctionnement et leur utilisation.

Les centrales électrogènes privilégient ainsi la récupération de l'énergie de la réaction de fission. Afin d'optimiser le rendement thermodynamique, elles fonctionnent à température élevée ; en revanche, on s'évertue à minimiser le flux neutronique afin de préserver la cuve contenant le lieu de la réaction. Aussi le combustible est-il peu enrichi en noyaux fissiles et le cœur occupe un volume important.

Les réacteurs expérimentaux mettent au contraire l'accent sur la production de neutrons. Les flux de neutrons peuvent y être plus intenses, avec des cœurs de plus petite taille et de plus faible puissance. Comme il n'y a pas besoin de récupérer l'énergie, ces réacteurs fonctionnent en général à basse température, soit par refroidissement direct dans une piscine, soit avec un circuit d'eau tiède.

Les réacteurs expérimentaux peuvent être regroupés en plusieurs familles. Les réacteurs d'irradiation technologique, comme le réacteur

Osiris au CEA Saclay, sont utilisés pour tester des matériaux et des combustibles, optimiser le fonctionnement des centrales et étudier les filières du futur. Certains réacteurs, comme Cabri au CEA Cadarache, sont dédiés à un type unique d'essai intéressant la sûreté nucléaire.

D'autres, comme le réacteur Orphée à Saclay, sont dévolus à la recherche fondamentale : il s'agit alors de mieux comprendre le noyau atomique, les interactions, l'origine et les différents états de la matière.

Enfin, des réacteurs d'enseignement servent à former le personnel appelé à intervenir sur de telles machines. À Cadarache, c'est le cas du réacteur Azur. À Saclay, cette mission a été dévolue au réacteur Ulysse (mis en service en 1961) ; à l'arrêt d'Ulysse en 2007, elle a été transférée au réacteur Isis.

La spécialisation des réacteurs nucléaires fut progressive, en relation avec le développement de la technologie nucléaire. Pour les concepteurs de la première pile française, Zoé (qui diverge en décembre 1948), l'urgence est d'acquérir le plus rapidement possible les données nucléaires de base, sans présager des développements



COMMENT FONCTIONNE UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE ?

Le principe d'un réacteur nucléaire est de déclencher une réaction en chaîne (c'est la « divergence »), de l'amener au niveau de puissance souhaité, de l'entretenir, de la contrôler et de l'arrêter à tout moment en capturant les neutrons libres.

La réaction nucléaire se déroule dans le cœur de l'appareil. Dans ce dernier sont disposés, suivant une géométrie très précise, les éléments du combustible⁴, qui contient les noyaux lourds fissiles (il s'agit en général d'uranium). La disposition géométrique assure le déclenchement et l'entretien de la réaction en chaîne ainsi que le refroidissement par un fluide appelé caloporteur¹. Elle permet en outre le passage des barres de commande³, longues perches mobiles constituées d'un matériau absorbant les neutrons, que l'on enfonce ou extrait suivant les besoins pour régler la puissance du réacteur ; en cas d'incident, la chute des barres au sein du combustible stoppe instantanément la réaction nucléaire. Les neutrons produits par la réaction de fission sont très énergétiques (environ 2 MeV). Mais il est d'autant plus facile pour les neutrons de déclencher une nouvelle fission dans

un cœur de réacteur que leur vitesse a été réduite (les neutrons sont alors dits « thermiques »). Aussi certains réacteurs comportent-ils un modérateur², chargé de ralentir les neutrons sans trop les absorber. C'est le cas des réacteurs à eau où l'eau de refroidissement est amenée à jouer à la fois le rôle de modérateur et de caloporteur. Le choix des constituants (combustible, caloporteur, modérateur) détermine la filière à laquelle appartient le réacteur.

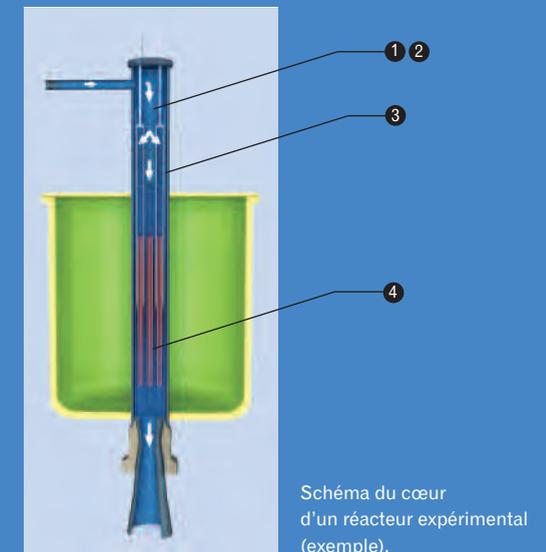


Schéma du cœur d'un réacteur expérimental (exemple).

ultérieurs. Dans les années 1950, la première génération de réacteurs français s'orientent soit vers des applications militaires ou de production d'électricité (réacteurs G1, G2 et G3 à Marcoule), soit vers des applications de recherche (réacteurs EL2 puis EL3 à Saclay).

La recherche avance alors en étroite liaison avec la conception technologique des réacteurs. Au CEA, Jacques Yvon et Jules Horowitz donnent une vive impulsion aux calculs de piles, qu'ils mènent de front avec le développement de la

science atomique fondamentale. Peu à peu se constitue autour d'eux une véritable « tradition française » en neutronique, discipline qui permet de concevoir les cœurs des réacteurs : « La neutronique est l'étude du cheminement des neutrons dans la matière et des réactions qu'ils y induisent, en particulier la génération de puissance par la fission de noyaux d'atomes lourds » (Paul Reuss). À côté du Service de physique mathématique est créé le Service de neutronique expérimentale, dont les premières activités sont



De gauche à droite, les réacteurs de recherche EL3, EL 2 et Osiris à Saclay, avant la construction d'Orphée.

Visite technique sur le chantier du réacteur Orphée le 2 juin 1977.



LES GRANDS ANCÊTRES : EL2 ET EL3

À Saclay, les premières expériences de diffusion neutroniques ont été réalisées sur les réacteurs EL2 puis EL3. EL2, qui diverge en octobre 1952, fait suite à Zoé ; c'est le premier réacteur expérimental de Saclay. Utilisant l'eau lourde comme modérateur et un gaz comprimé comme refroidisseur (N_2 puis CO_2), il est essentiellement destiné à des irradiations de matériaux de structure ou de petits échantillons fissiles et à la fabrication de radio-isotopes. En juillet 1957 lui est adjoint EL3, un réacteur polyvalent plus performant et plus flexible, destiné en particulier à l'étude technologique des combustibles des différentes filières de réacteurs électrogènes. À l'époque, EL3 est la pile expérimentale la plus puissante d'Europe et des faisceaux de neutrons sortis permettent d'initier les recherches fondamentales sur la structure de la matière. Ses missions seront par la suite poursuivies par le réacteur Osiris, pour les essais technologiques, et le réacteur Orphée, pour les faisceaux sortis.



L'INGÉNIERIE DES RÉACTEURS, DU CEA À TECHNICATOME

Le Commissariat à l'Énergie atomique, créé par l'ordonnance du 18 octobre 1945, a vocation à impulser et coordonner l'ensemble des recherches nucléaires françaises. Sa compétence et ses missions s'étendent à la fois aux domaines scientifique, industriel et militaire. Avec le démarrage du programme industriel, les progrès de la neutronique et la spécialisation progressive des installations nucléaires, le CEA affirme sa maîtrise croissante de la conception et de la réalisation des réacteurs. Une cellule spécialisée, le Bureau des Piles, est constituée en 1955, sous la responsabilité de Maurice Pascal, afin de piloter la construction des piles de Marcoule. Les fondements de la politique du CEA en la matière sont posés : l'organisme public établira les projets des réacteurs, en assurera l'ingénierie en coordonnant et surveillant leur réalisation dévolue aux industriels, et conduira les essais jusqu'à la livraison des installations aux exploitants. La petite équipe de 1955 grandit, devenant successivement le Service puis la Division de Construction des Réacteurs, avant de former le 1^{er} juillet 1972 la société Technicatome. Celle-ci a rejoint en 2001 le groupe Areva.



LA SÛRETÉ DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES

Les réacteurs nucléaires doivent garantir en permanence trois fonctions de sûreté :

- le contrôle de la réaction en chaîne – donc la puissance produite ;
- l'évacuation de l'énergie issue de la réaction en chaîne – y compris la puissance résiduelle ;
- le confinement des produits radioactifs.

Ces considérations sont à la base des principes de conception des réacteurs. L'ingénierie nucléaire intègre en la matière les résultats des recherches et retours d'expérience mondiaux sur plus d'un demi-siècle. Elle est en outre fondée sur la philosophie de la « défense en profondeur », qui postule que des défaillances humaines et techniques sont toujours possibles et que chaque disposition de sécurité doit être protégée par une autre disposition. C'est ainsi que l'on prévoit d'interposer trois barrières étanches, résistantes et indépendantes, entre les produits dangereux et l'environnement : la gaine du combustible ; le circuit de refroidissement ; l'enceinte de confinement. Les systèmes qui permettent de garantir ces fonctions de sûreté sont fabriqués avec des matériaux d'une grande fiabilité et doivent supporter toutes les conditions d'exploitation, des situations normales jusqu'à des accidents très

hypothétiques. Ils sont surveillés en permanence et bénéficient d'un programme de maintenance poussé.

L'exploitation des réacteurs est conçue en fonction de ces impératifs : identifier clairement les situations potentiellement dangereuses, définir des plages de fonctionnement sans risque, mettre en place des alertes qui bornent ces plages de fonctionnement normal et des dispositifs pour maîtriser les situations accidentelles. D'un point de vue réglementaire, les prescriptions techniques (PT), les règles générales d'exploitation (RGE) délimitent le domaine et les normes de fonctionnement normal du réacteur. Par ailleurs, en France, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) demande de procéder tous les dix ans à une réévaluation générale de la sûreté, qui est l'occasion d'inspecter en profondeur l'état de vieillissement des matériels, la conformité de l'installation aux exigences de sûreté et d'identifier les améliorations susceptibles d'être apportées. Enfin, une attention toute particulière est apportée aux facteurs humains et au travail quotidien.

Les équipes d'exploitation partagent une « culture de sûreté » fondée sur un principe simple : les impératifs de sûreté priment toute autre considération. Les responsabilités de chacun sont clairement définies et les procédures de conduite sont formalisées, afin que les opérateurs comme les cadres sachent quoi faire en toute situation. Cette organisation est régulièrement testée par des exercices simulant des incidents.



Jules Horowitz
(à droite) accueille
Gaston Palewski,
ministre d'État chargé
de la recherche
scientifique et des
questions atomiques,
à Saclay en 1962.

de mesurer les sections efficaces de fission des isotopes de l'uranium et du plutonium. Des appareils spécifiques comme des spectromètres sont par ailleurs installés sur les faisceaux de neutrons sortis d'EL2 et d'EL3 et l'on commence à utiliser des techniques telles que la diffusion et la diffraction neutroniques pour étudier les propriétés de la matière.

La neutronique, la physique nucléaire, la physique des particules et la physique des états condensés gagnent progressivement leur autonomie. Cette évolution se traduit en 1962 par la scission de la direction de la Physique et des Piles atomiques du CEA en une direction des Piles atomiques et une direction de la Physique, dont Anatole Abragam prend la responsabilité. Les flux neutroniques des réacteurs augmentent, les outils des expérimentations associées se développent et les équipes de Saclay acquièrent une reconnaissance internationale, comme celle de F. Netter et J. Julien sur la diffusion et la capture de neutrons lents, ou celle d'A. Herpin sur l'étude des propriétés des solides par les neutrons. Les réacteurs de recherche demeurent cependant polyvalents : ils servent à la fois aux études de neutronique, aux irradiations expérimentales, aux essais de sûreté et aux recherches sur la structure de la matière condensée. On utilise principalement les réacteurs EL3 à Saclay, Mélusine et Siloé à Grenoble pour satisfaire les besoins expérimentaux nationaux en neutrons thermiques.

De RHF à Orphée, une nouvelle génération de « réacteurs à faisceaux sortis »

Avec la spécialisation croissante des disciplines, des demandes de plus en plus nombreuses et l'amélioration des performances techniques des appareils, apparaît une nouvelle génération de réacteurs expérimentaux. Les

De « pile » à « réacteur »

En 1942, Enrico Fermi construisit le premier réacteur sous les gradins du grand stade désaffecté de Chicago. Pour obtenir la divergence, il empila alternativement des blocs de graphites et des blocs d'uranium métallique. Cet empilement divergea le 2 décembre 1942 et, depuis, les réacteurs expérimentaux sont souvent qualifiés de « pile » ... même si aujourd'hui nos réacteurs n'ont plus rien à voir avec un empilement de briques de matériaux !

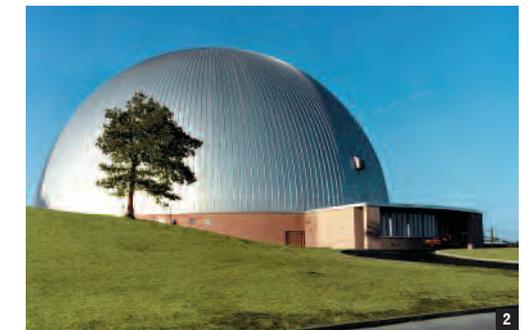


réacteurs dédiés à la recherche fondamentale se distinguent désormais de ceux dédiés aux développements technologiques pour le nucléaire. À Brookhaven, aux États-Unis, démarre en 1965 le premier réacteur à haut flux (de l'ordre de 10^{15} neutrons par cm^2 et par seconde) spécifiquement destiné à être une source de neutrons pour la recherche fondamentale : le HFBR, d'une puissance de 60 MW. Il est suivi en 1966 par le HFIR (100 MW) d'Oak Ridge, toujours aux États-Unis. La France et l'Allemagne décident, en janvier 1967, de se doter d'un instrument analogue et créent conjointement l'Institut Max Von Laue – Paul Langevin (ILL), chargé de piloter le réacteur à haut flux (RHF) qui sera implanté à Grenoble. Elles seront rejointes en 1972 par la Grande-Bretagne, qui est alors à la pointe de l'utilisation de la spectrométrie neutronique en chimie et en biologie.

Le RHF diverge le 31 août 1971. Destiné à accueillir des expériences sur la physique nucléaire (étude de la fission et de la spectroscopie

1. Le hall d'expérimentation d'EL3, à Saclay. Une grande partie des instruments et des techniques utilisés par le LLB y ont été mis au point – en particulier la diffusion de neutrons de grande longueur d'onde générés par une source froide à hydrogène liquide et

acheminés vers les spectromètres par des guides à neutrons.
2. Le dôme du High Flux Beam Reactor (HFBR) en 1962. Au début des années 1960, les Européens (Britanniques, Allemands, Français) commencent à élaborer leurs propres projets.



Nom	Localisation	Divergence	Situation	Type	Flux maximum (en neutrons.cm ² .s ⁻¹)	Puissance thermique maximale	Vocation
Zoé	Fontenay-aux-Roses	1948	Arrêté en 1974	Oxyde d'uranium, eau lourde	5x10 ¹¹	150 kW	Première pile expérimentale française
EL2	Saclay	1952	Arrêté en 1965	Uranium métallique, gaz, eau lourde	10 ¹³	2,4 MW	Physique des piles, comportement des matériaux, production de plutonium et de radio-isotopes ; prépare les piles industrielles.
EL3	Saclay	1957	Arrêté en 1979	Uranium légèrement enrichi, eau lourde. Réacteur piscine	2x10 ¹⁴	18 MW	Étude technologique des éléments combustibles des différentes filières ; production de radio-isotopes ; utilisation de faisceaux de neutrons
Mélusine	Grenoble	1958	Arrêté en 1989	Uranium enrichi, eau légère. Réacteur piscine	6x10 ¹³	8 MW	Réacteur d'irradiation pour la recherche fondamentale et appliquée
Triton	Fontenay-aux-Roses	1959	Arrêté en 1982	Uranium enrichi, eau légère. Réacteur piscine	4x10 ¹³	6,5 MW	Réacteur d'irradiation pour la recherche fondamentale et appliquée. Production de radioéléments
Minerve	Fontenay-aux-Roses puis Cadarache	1959	En fonctionnement	Uranium enrichi, eau légère. Réacteur piscine	10 ¹¹	100 W	Neutronique expérimentale : étude de cœurs, mesure des sections efficaces des matériaux
Siloé	Grenoble	1963	Arrêté en 1997	Uranium enrichi, eau légère. Réacteur piscine	3x10 ¹⁴	35 MW	Réacteur d'irradiation pour la recherche fondamentale et appliquée. Production de radioéléments
Pégase	Cadarache	1963	Arrêté en 1975	Uranium enrichi, eau légère. Réacteur piscine	2x10 ¹⁴	35 MW	Essai des combustibles pour les réacteurs de puissance
Cabri	Cadarache	1964	En fonctionnement	Oxyde d'uranium, eau légère		25 MW	Études de sûreté nucléaire filière neutrons rapides et REP
Harmonie	Cadarache	1965	Arrêté en 2004	Uranium enrichi, air	10 ¹²	2 kW	Réacteur source pour expériences neutroniques sur la filière RNR
Osiris	Saclay	1966	En fonctionnement	Uranium enrichi, eau légère. Réacteur piscine	3x10 ¹⁴	70 MW	Étude des combustibles et des matériaux sous irradiation. Production de radioéléments
Phénix	Marcoule	1973	En fonctionnement	Réacteur à neutrons rapides	7x10 ¹⁵	563 MW	Utilisé comme réacteur de recherche depuis 2003. Études de transmutation pour la gestion des déchets nucléaires et préparation des systèmes du futur
Phébus	Cadarache	1978	En fonctionnement	Réacteur piscine	1,8x10 ¹⁴	40 MW	Études de sûreté nucléaire
Orphée	Saclay	1980	En fonctionnement	Uranium enrichi, eau lourde. Réacteur piscine	3x10 ¹⁴	14 MW	Utilisation de faisceaux sortis



Vue de dessus de la plaque mécanosoudée qui supporte tous les assemblages combustibles du réacteur Masurca.

Pour mettre au point le cœur des réacteurs, des études poussées sont conduites sur des maquettes critiques (réacteur permettant de valider le point de divergence sans atteindre des puissances significatives).

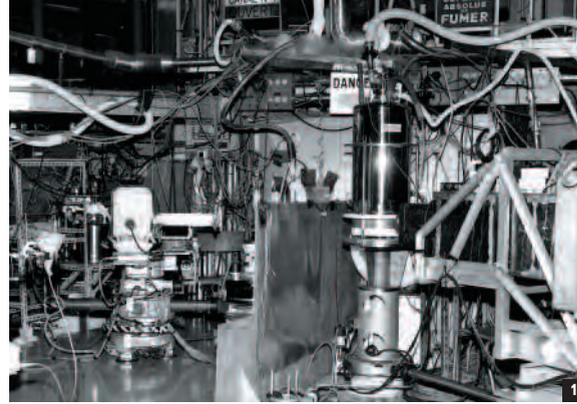
À cette fin, la pile Aquilon est mise en route en 1956 ; elle est destinée à améliorer la connaissance des données nucléaires pour la filière des réacteurs à uranium naturel, modérés à l'eau lourde ou au graphite. D'autres suivent : Proserpine (1958), pour les études des réacteurs de type homogène où matière fissile et modérateur sont mélangés ; Alizé (1959) et Éole (1965), pour les filières à eau légère (REP et REB) ; Marius (1960) et César (1964) pour les études de réseaux ; Néréide (1961) pour les études de sûreté ; Masurca (1966) pour la filière à neutrons rapides (RNR).

À la Direction de l'Énergie Nucléaire du CEA, la démarche de conception de nouveaux réacteurs se poursuit aujourd'hui avec l'engagement à Cadarache du réacteur Jules Horowitz (pour l'étude de matériaux et combustibles et la production de radioéléments) et les projets liés à la 4^e génération de réacteurs nucléaires.

1. Le hall d'expérimentation d'EL3 en 1978. La continuité entre EL3 et Orphée est assurée par le transfert des équipes, des programmes et des instruments de recherche.

2. L'Institut Laue-Langevin et le Réacteur à Haut Flux à Grenoble. L'ILL est une grande

réussite scientifique européenne, gérée en 2008 par la France, l'Allemagne et la Grande-Bretagne en association avec neuf autres pays : l'Espagne, la Suisse, l'Autriche, l'Italie, la République tchèque, la Suède, la Belgique, la Hongrie et la Pologne. Les douze associés se partagent l'accès à ses infrastructures.



nucléaires), la physique des états solide et liquide, la chimie et la biologie, c'est (aujourd'hui encore !) la source continue de neutrons la plus performante au monde, avec un flux de $1,5 \times 10^{15}$ neutrons par cm^2 par seconde pour une puissance de 58 MW. Financé, côté français, à part égale par le CEA et le CNRS, le RHF constitue une étape essentielle dans l'élaboration de sources neutroniques pour l'ensemble de la communauté scientifique. Les avancées de la physique exigent en effet des moyens expérimentaux de plus en plus nombreux, lourds et onéreux – donc une mutualisation croissante des moyens et une meilleure organisation de la recherche. La convention signée le 2 février 1974 par le CNRS et le CEA traduit cette nouvelle exigence, en créant un conseil scientifique chargé de coordonner les activités de spectrométrie et de diffraction neutroniques à Grenoble et à Saclay.

Le RHF ne suffit pas à répondre aux besoins croissants de la discipline. Les techniques de la diffraction et de la diffusion neutroniques étant parvenues à maturité, elles intéressent un nombre croissant de chercheurs venus de disciplines variées ; la mise en service du RHF, loin de satisfaire les demandes, les stimule ! Il faut en outre penser à la formation des chercheurs et à la couverture régulière des besoins nationaux, qui ne peuvent être assurées par cet

instrument multinational. Comme le conclut en 1973 le rapport d'experts commandé par la direction du CNRS : « On en arrive ainsi à la conception d'une organisation [de la diffusion neutronique] à deux niveaux, les piles nationales "normales" d'une part, d'autre part la pile RHF à haute performance [...] Si plus de chercheurs peuvent utiliser les piles nationales, cela ne réduira pas la clientèle française du RHF, mais au contraire l'augmentera par rapport à la situation présente à cause des demandes de ceux qui veulent compléter, développer, affiner des mesure faites avec une pile nationale ».

Or EL3, principale source française de neutrons thermiques après le RHF, va interrompre son activité. D'une part, les nouvelles exigences de sûreté lui imposent un chantier de jouvence particulièrement coûteux, comportant notamment la rénovation intégrale du circuit de refroidissement. D'autre part, la polyvalence même du réacteur l'empêche de répondre aux besoins des années 1970. À partir de 1975, notamment, on n'y réalisera plus d'irradiations technologiques, celles-ci étant transférées sur Osiris ; les emplacements rendus disponibles n'étant pas récupérables pour d'autres usages, cette décision ne profitera pas aux physiciens. On envisagera donc la construction d'un nouveau réacteur, qui serait cette fois dédié à l'utilisation de faisceaux sortis. Ce sera Orphée.

Le chant d'Orphée

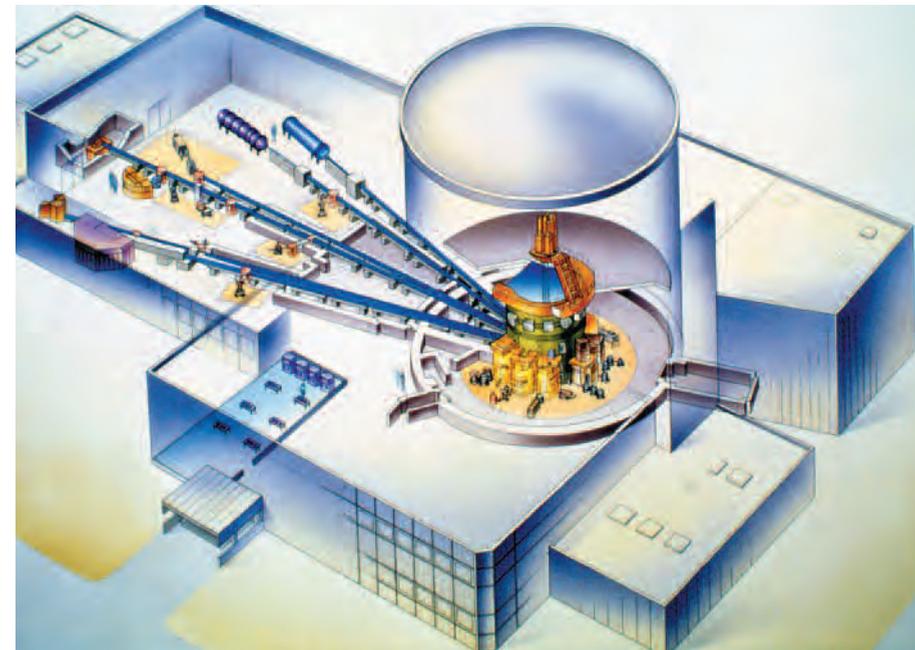
La construction du réacteur

Les études préliminaires de la nouvelle pile, provisoirement appelée EL3', débutent en 1971. La signature en 1974 de la convention CEA / CNRS créant une structure commune, le Laboratoire Léon Brillouin, chargée de préparer et d'encadrer les recherches sur le futur instrument, leur donne une nouvelle impulsion.

Le projet définitif est élaboré par la société d'ingénierie Technicatome, filiale du CEA, en collaboration avec les services concernés du CEA, le Service d'étude des réacteurs et des mathématiques appliquées (qui calcule les paramètres neutroniques et thermiques) et le Service des piles de Saclay. Il est accepté au début de l'année 1976 par le Conseil de l'Énergie atomique.

Les travaux débutent dès le mois de juin sur un emplacement contigu à EL3. Le jeune Institut de recherche fondamentale, créé l'année précédente sous la direction de Jules Horowitz, assure la maîtrise d'ouvrage, avec Technicatome comme architecte industriel et sous l'étroite

surveillance du Département de Sûreté nucléaire. Les travaux de gros œuvre durent deux ans. L'enceinte en béton du bâtiment réacteur est coulée en novembre 1976, l'érection des bâtiments s'achève en 1978 par la mise en place de la coupole du bâtiment réacteur et la construction du hall des guides. Viennent ensuite l'équipement du bloc pile et des canaux, puis celui de la piscine. On procède alors aux essais en inactif de tous les composants du réacteur. Avec quelques mois de retard sur le programme initial, le nouveau réacteur diverge le 19 décembre 1980 à 6h30. On l'appelle « Orphée » (Outil pour la Recherche en Physique de l'État condensé), en référence au héros de la mythologie grecque dont le chant si beau attirait humains, animaux sauvages et même, dit-on, pierres et arbres... à l'instar des neutrons qui réussissent à faire vibrer les atomes « inanimés » d'un échantillon ! De même que le poète jouait d'une lyre à neuf cordes, en hommage aux neuf Muses, le « nouvel » Orphée tirera ses neutrons de neuf canaux répartis autour du cœur du réacteur.



Esquisse de principe du réacteur Orphée. Les concepteurs ont choisi un dimensionnement adapté aux besoins des utilisateurs, en jouant sur l'optimisation du couple source de neutrons – spectromètres plutôt que sur les performances intrinsèques de la source.



1



2



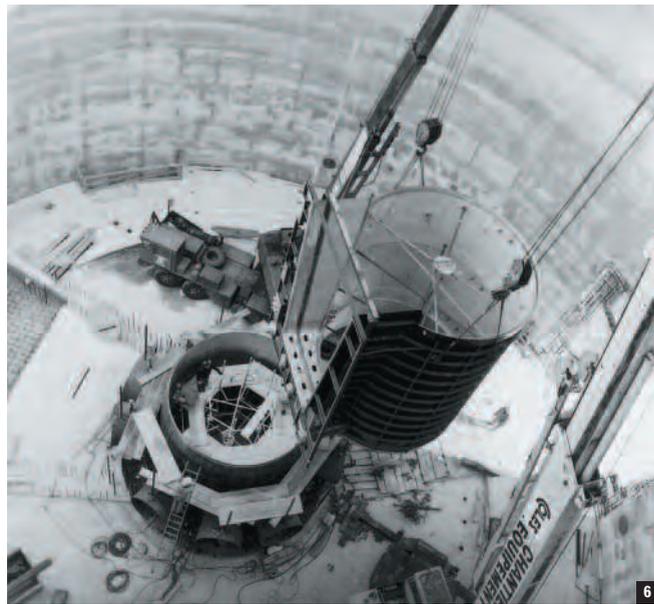
3



4



5



6



7



8



9



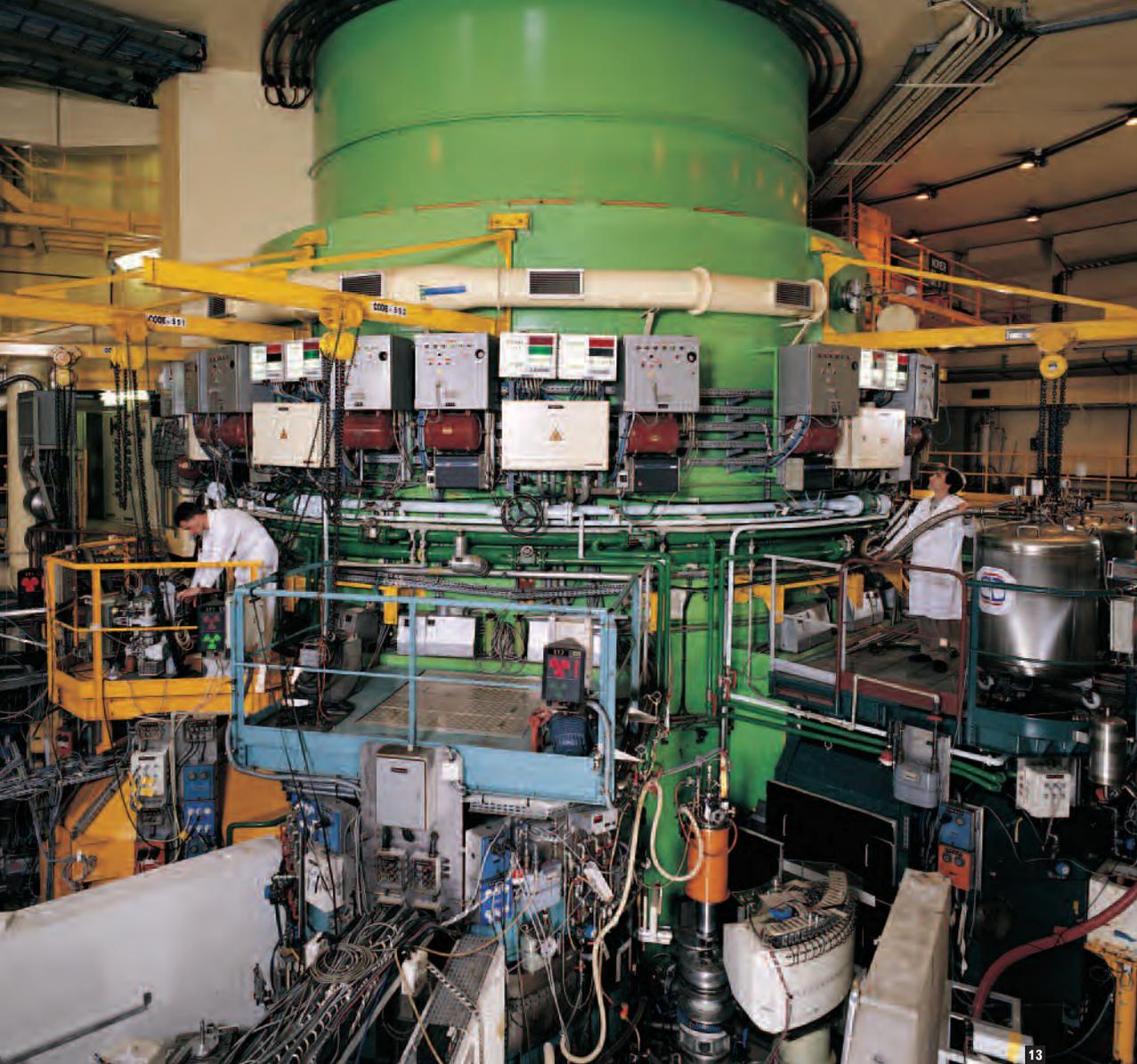
10



11



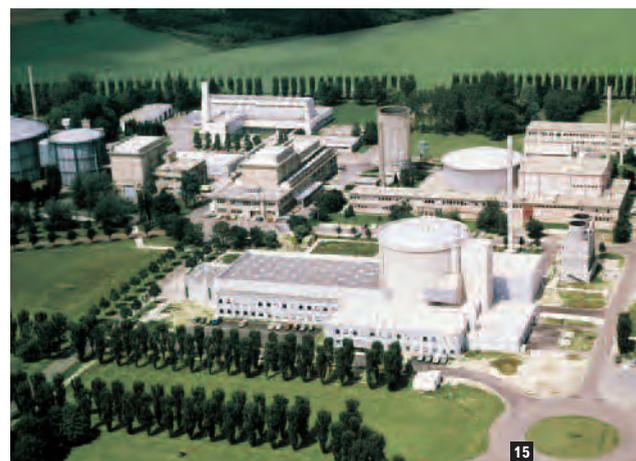
12



13



14



15

Double page précédente : piscine, fabriqué par la société grenobloise Neyrpic.

1. Bienvenue sur le chantier !

2. 21 septembre 1976 : construction du radier.

3. 28 septembre 1976 : Début du béton.

4. Novembre-décembre 1976. L'enceinte prend forme.

5. 3 mai 1977 : arrivée sous escorte de l'élément central du cuvelage de la

6. 27 mai 1977 : mise en place de l'élément supérieur du cuvelage.

7. 22 septembre 1977 : mise en place du pont polaire 15 T servant à la manutention de toutes les pièces lourdes.

8. 5 mai 1978 : fermeture de la coupole du réacteur.

9. Été 1978 : construction des aérorefrigérants.

10. Finalisation des éléments internes de la piscine.

11. Mise en place des bouchons et les protections biologiques dans le hall des expérimentateurs.

12. Orphée à la mise en service.

13. Orphée en fonctionnement : vue du hall des expérimentateurs.

14. Orphée en fonctionnement : la margelle de la piscine, au-dessus du cœur du réacteur.

15. Orphée à pied d'oeuvre devant EL3, EL2 et Osiris.

L'inauguration officielle a lieu le 26 février 1981, en présence d'André Giraud, ministre de l'Industrie et ancien administrateur général du CEA, d'Alice Saunié-Seité, ministre des Universités, de Pierre Aigrain, secrétaire d'État à la Recherche, et de Jean Teillac, Haut-Commissaire du CEA.

Caractéristiques générales

Le principal objectif d'Orphée est de couvrir, en complément du RHF, les besoins nationaux en faisceaux de neutrons pour la diffraction et la

spectrométrie neutroniques : si son flux thermique est moindre que celui de son prestigieux cousin grenoblois, il dispose d'outils technologiques aussi performants, en particulier deux sources froides et une source chaude (voir p. 47). Orphée est en outre appelé à prendre la suite d'EL3 pour des utilisations connexes, comme la production de radioéléments et les analyses par activation.

Sa conception répond à trois impératifs : un coût modéré, une sûreté renforcée et des performances excellentes. Orphée a été pensé comme



Ci-contre, en haut : les premiers neutrons produits par Orphée sont enregistrés à l'extrémité d'un guide à neutrons le 29 décembre 1980.

Commissaire à l'énergie atomique Jean Teillac, l'administrateur général du CEA Michel Pecqueur, la ministre des Universités Alice Saunié-Seité, le ministre de l'Industrie André Giraud, le secrétaire d'État chargé de la Recherche Pierre Aigrain et le directeur du LLB Daniel Cribier.

En bas : l'inauguration du réacteur Orphée, le 26 février 1981. On reconnaît, de gauche à droite : le Haut-



un outil opérationnel pour la recherche ; il utilise des procédés éprouvés, grâce aux retours d'expérience d'EL3 et du RHF pour les réacteurs à faisceaux sortis, de Siloé et d'Osiris pour les piles piscine – une technologie retenue en raison de la simplicité de sa mise en œuvre.

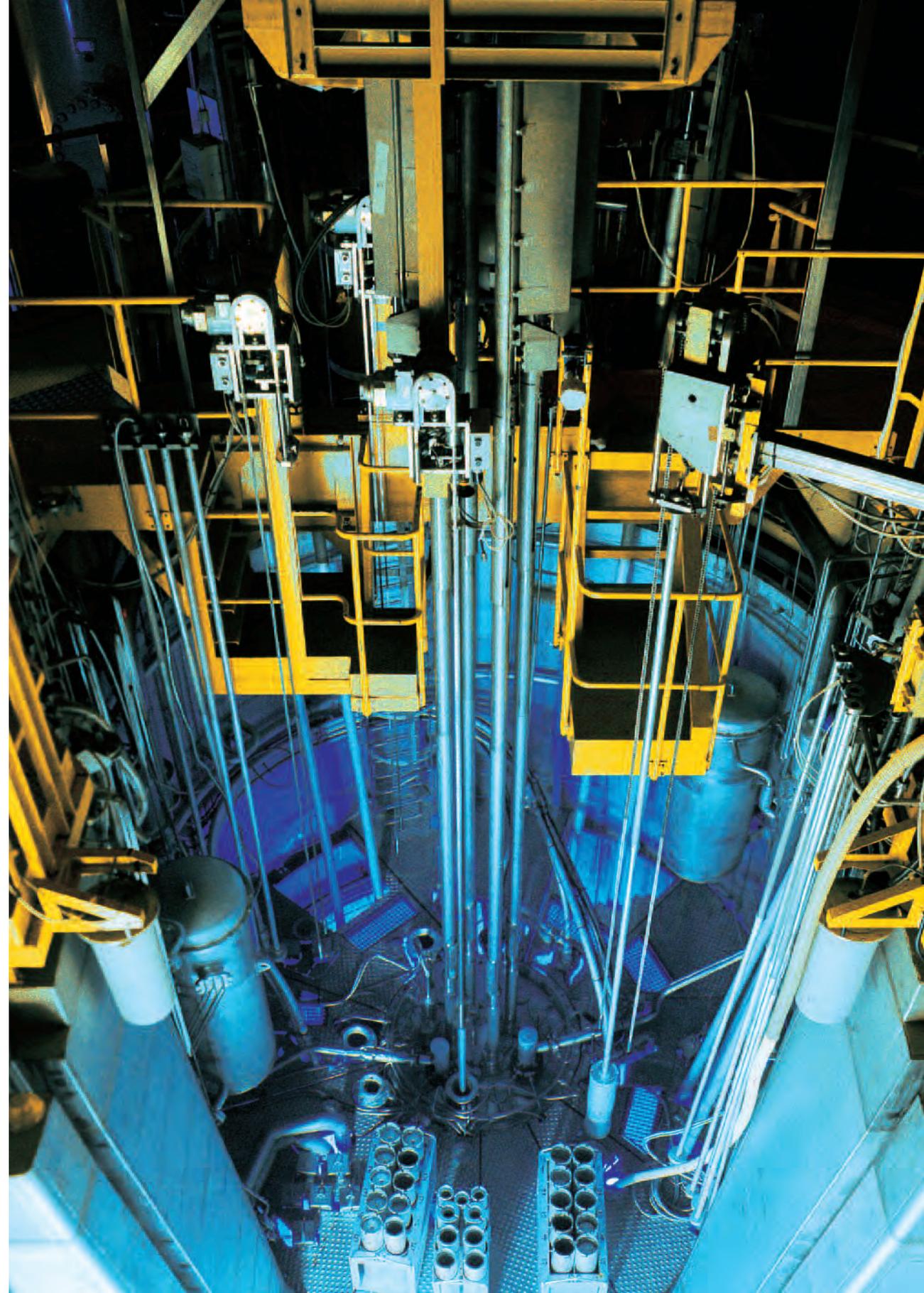
Les caractéristiques générales de l'installation ont été fixées de façon à permettre la sortie d'un grand nombre de faisceaux de neutrons. « Nous recherchions une source très intense avec un combustible à plaques pour favoriser les échanges thermiques », précise Paul Bréant, concepteur et premier chef d'exploitation d'Orphée. Le cœur du réacteur, très compact, est composé d'un bloc central de béryllium entouré d'éléments combustibles, eux-mêmes composés de plaques d'uranium gainées d'aluminium ; le tout est logé dans un petit caisson de section 25 x 25 cm et de 90 cm de hauteur. Ce cœur est placé au centre d'une cuve d'eau lourde qui, jouant à la fois le rôle d'un réflecteur et d'un ralentisseur de neutrons, est une zone d'accumulation de neutrons « thermiques ». Les qualités neutroniques de faible absorption et de grande longueur de diffusion de l'eau lourde garantissent la qualité du flux fourni et la disponibilité d'un volume expérimental suffisant. Le cœur et la cuve sont immergés dans une piscine remplie d'eau ordinaire déminéralisée, qui assure la protection contre les rayonnements tout en permettant une manutention simple.

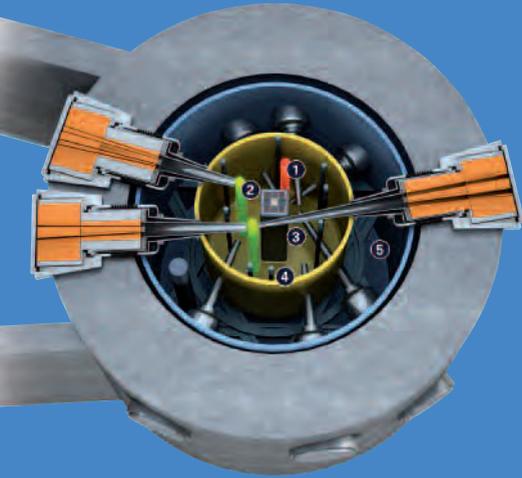


L'effet Cerenkov

Dans un réacteur nucléaire de type piscine en fonctionnement, le cœur est entouré d'un halo de lumière bleue. Ce phénomène, appelé « effet Cerenkov » du nom du savant russe l'ayant expliqué en 1934, est à rapprocher de celui du mur du son, mais pour la lumière : lorsque des particules chargées électriquement émises par les réactions nucléaires arrivent dans l'eau à une vitesse proche de la vitesse de la lumière dans l'eau des photons de couleur bleue sont produits lors du ralentissement des particules. Dans le cas d'un cœur de réacteur nucléaire, l'effet Cerenkov est dû principalement à l'émission de particules β . L'effet Cerenkov est aujourd'hui utilisé également pour détecter d'autres particules, notamment le neutrino.

L'effet Cerenkov illumine le fond de la piscine du réacteur Orphée.





Coupe horizontale de la cuve à eau lourde et de la piscine :

1. Source chaude
2. Source froide
3. Cœur
4. Cuve à eau lourde
5. Piscine

Les fourchettes en hafnium des barres sont disposées aux quatre coins du cœur (de couleur rose sur la coupe du cœur ci-dessous) et maintenues sur leurs mécanismes grâce à quatre électroaimants. La coupure de l'alimentation électrique provoque instantanément la chute des barres de contrôle et étouffe la réaction en chaîne.

La population de neutrons est contrôlée en permanence par trois ensembles de capteurs et d'électroniques de traitement de haute fiabilité.

Le refroidissement du cœur

Le refroidissement du cœur est assuré par un « circuit cœur » 4 d'eau légère déminéralisée, qui extrait du combustible l'énergie produite par les réactions de fission (14 MW). Le circuit cœur, complété par la piscine, constitue la deuxième barrière séparant les produits de fission de l'environnement. Deux pompes 9 assurent la circulation d'eau, à un débit voisin de 800 m³/h, dans deux échangeurs à plaques 8 qui transfèrent l'énergie à l'eau légère du circuit secondaire. Celui-ci l'évacue ensuite dans l'atmosphère par l'intermédiaire de deux aéroréfrigérants.

La cuve à eau lourde 2

Le caisson cœur est inséré dans une cuve annulaire contenant environ 6 m³ d'eau lourde. C'est dans la cuve à eau lourde que le flux de neutrons thermiques est maximal : 3.10¹⁴n.cm⁻².s⁻¹. Afin de prélever des neutrons pour les expériences, 9 doigts de gant en aluminium traversent la paroi de la cuve à eau lourde et plongent dans ce flux de neutrons.

LE RÉACTEUR ORPHÉE

Dans les paragraphes suivants les numéros apparaissant entre parenthèses renvoient au schéma de la coupe page suivante.

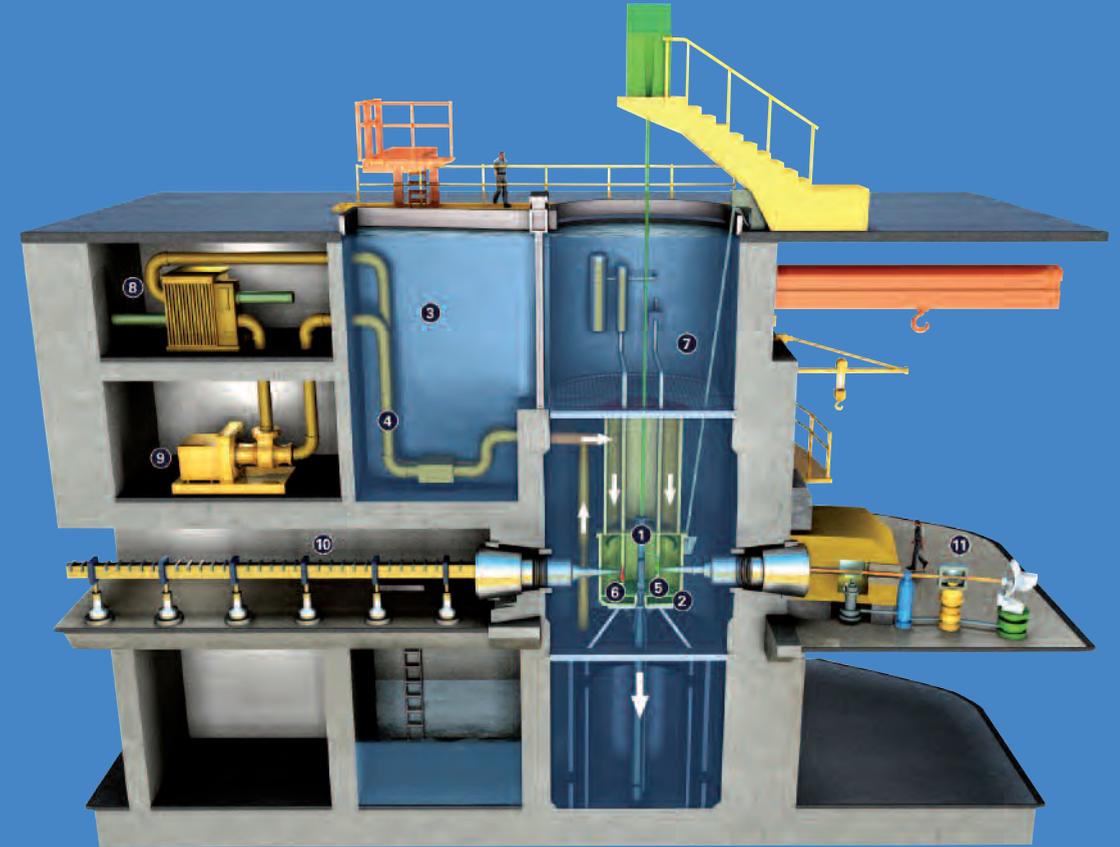
Le cœur 1

Le combustible est constitué de plaques de type alliage métallique U-Al (uranium-aluminium) enrichi en uranium 235. Les gaines d'aluminium des plaques sont la première barrière.

Les plaques combustibles sont rassemblées en « éléments ». Un cœur est constitué de 8 éléments combustible et d'un élément réflecteur béryllium central ; il forme un parallélogramme de 25 cm de côté et 90 cm de hauteur.

La réaction en chaîne est contrôlée par quatre « barres de commande » portant un matériau absorbant les neutrons, le hafnium.

Coupe horizontale du cœur.



Coupe verticale du réacteur Orphée :
1. Cœur
2. Cuve à l'eau lourde
3. Canal de transfert
4. Circuit primaire
5. Source chaude

6. Source froide
7. Piscine
8. Échangeur
9. Pompes
10. Guide de neutron
11. Spectromètre

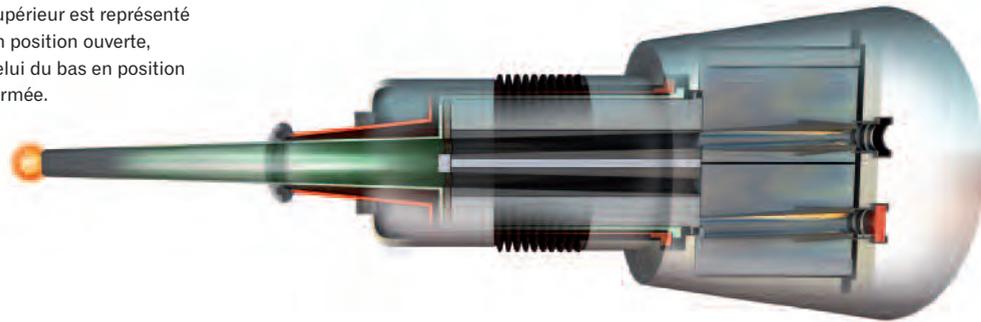
La piscine

Le cœur, une partie du circuit cœur et la cuve à eau lourde sont plongés dans une piscine contenant environ 300 m³ d'eau légère déminéralisée. Le volume d'eau autour du cœur assure une protection du personnel d'exploitation contre les rayonnements tout en permettant la manipulation sous eau d'éléments irradiants. Une partie de la piscine, appelée « canal de transfert » 3 est dédiée à la préparation du combustible avant et après son utilisation ainsi qu'aux manipulations de matériaux irradiés.

Le bâtiment réacteur

Le bâtiment réacteur qui contient la piscine, le cœur et le circuit cœur est appelé « enceinte de confinement ». Elle constitue la troisième barrière séparant les produits de fission de l'environnement. L'enceinte est équipée d'un système de ventilation qui permet, en fonctionnement normal, de maintenir l'intérieur en dépression par rapport à l'extérieur. La perte de la dépression dans le bâtiment réacteur provoque l'arrêt automatique de la réaction en chaîne par chute des barres de contrôle. L'enceinte a par ailleurs été dimensionnée pour résister aux différents accidents pouvant survenir sur le réacteur.

Coupe d'un canal horizontal. Le faisceau supérieur est représenté en position ouverte, celui du bas en position fermée.



Le long voyage

des neutrons

Dans le cœur du réacteur, les neutrons sont produits à haute énergie (ils ont des vitesses de l'ordre de 20 000 km/s). Ils sont ensuite ralentis jusqu'à des vitesses de l'ordre de 2 km/s par des chocs successifs, notamment avec l'eau de refroidissement du cœur ou avec l'eau lourde. À la fin du processus de ralentissement, les neutrons se mettent en équilibre thermique avec le milieu qu'ils traversent.

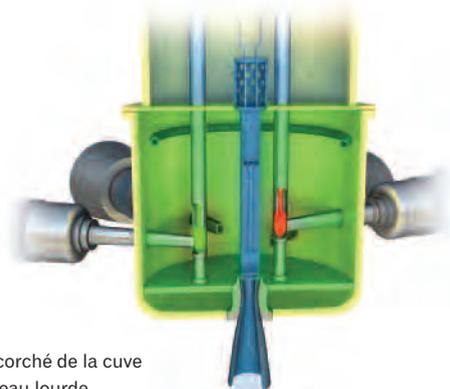
Il faut alors prélever une partie des neutrons et les diriger vers les aires expérimentales situées à l'extérieur de la piscine du réacteur. Pour ce faire, des canaux horizontaux en aluminium (« doigts de gants ») pénètrent dans la cuve à eau lourde jusqu'à environ 40 cm du cœur, pointant vers la zone de la cuve où le flux de neutrons thermiques est maximal – mais dans des directions tangentes au cœur afin d'éviter la sortie de neutrons rapides et de rayonnements γ .

Les 90 cm de hauteur de la zone combustible du cœur permettent de disposer simultanément, sur 3 niveaux, 9 doigts de gants de grande section. Ceux-ci permettent à leur tour d'extraire de la piscine réacteur 20 faisceaux de neutrons, dirigés vers 26 aires expérimentales.

Le flux de neutrons entretenu dans la cuve d'eau lourde contient essentiellement des neutrons thermalisés d'environ 25 meV d'énergie. Or de

nombreuses expériences nécessitent des neutrons, soit de faible énergie (inférieure à 5 meV), soit d'énergie élevée (supérieure à 100 meV), qui ne sont présents qu'en très petit nombre dans le flux issu de la source thermique. Il faut donc faire appel à des modérateurs dits « secondaires » ; ceux-ci, placés dans la piscine réacteur, vont créer des conditions thermiques locales modifiant l'énergie moyenne des neutrons.

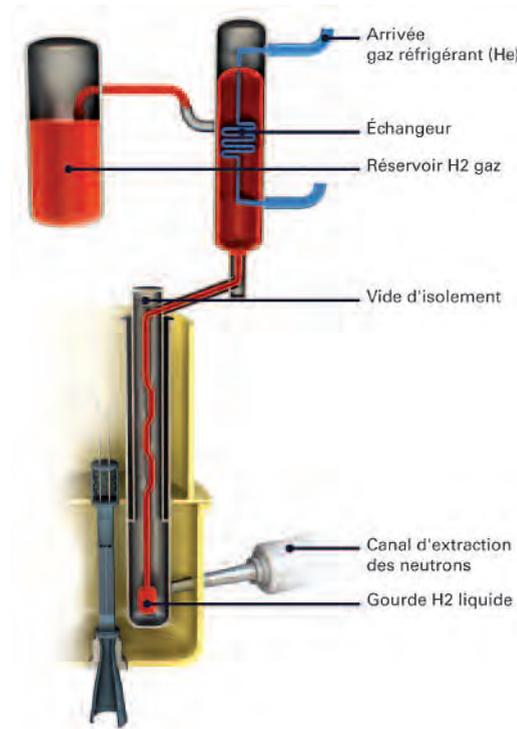
Les deux sources froides alimentent, par l'intermédiaire de trois canaux, 19 des 26 aires expérimentales : elles constituent l'élément central du dispositif. Elles sont composées de deux cellules-gourdes contenant de l'hydrogène liquide à 20 K (soit -250°C), chacune étant placée dans une enceinte de sécurité maintenue sous vide et implantée dans le réflecteur d'eau lourde (cette enceinte est appelée « chaussette »).



Écorché de la cuve à eau lourde.

Neutrons produits par Orphée

	Energie	Vitesse associée	Longueur d'onde (Å)	Température d'équilibre
Neutrons issus des fissions dans le cœur	2 MeV	20 000 km/s	2×10^{-4}	Hors équilibre thermique
Neutrons thermiques	0,025 eV	2 200 m/s	1,8	300 K
Neutrons froids (sources froides)	0,002 eV	600 m/s	6,8	20 K
Neutrons chauds (source chaude)	0,120 eV	4 800 m/s	0,8	1 400 K



Source froide, schéma de principe (côtes réelles non respectées).

Sous l'effet du rayonnement nucléaire, l'hydrogène se met à bouillir, et le gaz ainsi produit remonte jusqu'à un condenseur où il est à nouveau liquéfié. Le liquide s'écoule par gravité jusqu'à la cellule – et la boucle est bouclée.

La source chaude est quant à elle composée d'un bloc de graphite placé dans l'axe du cœur et porté à environ 1 400 K (+1127 °C) par le rayonnement γ issu de celui-ci.

On peut ainsi disposer de 8 faisceaux de neutrons thermiques, 8 faisceaux de neutrons froids et 4 faisceaux de neutrons chauds.

La sélection plus fine des neutrons utiles à chaque expérience s'effectue dans un second temps : un appareil appelé « monochromateur » prélève, dans le faisceau, les neutrons dont la longueur d'onde se situe à l'intérieur d'une bande donnée et les dirige sur l'échantillon à étudier ; les autres neutrons du faisceau, soit entre 90 et 99 % du total, traversent le monochromateur et sont absorbés dans des matériaux spécifiques (les « *beam catcher* »). Les spectromètres constituent le point d'aboutissement du dispositif (voir chapitre 3).

La difficulté est de répartir les postes d'expérimentation de la manière la plus rationnelle possible, sachant que les spectromètres sont des appareils volumineux. Il faut arriver à les disposer les uns derrière les autres, en rentabilisant au mieux chaque faisceau, sans qu'il y ait perte de flux du fait de l'éloignement. Un vrai casse-tête ! C'est là qu'intervient un autre instrument, particulièrement ingénieux : le guide à neutrons.



1



2

Imaginé par l'équipe du professeur Heinz Maier-Leibnitz au réacteur allemand de Garching, les guides à neutrons ont été pour la première fois expérimentés en France sur la pile EL3 à la fin des années 1960. Ils permettent de transporter des neutrons avec peu de pertes sur des distances de l'ordre de quelques dizaines de mètres. L'efficacité du guidage est d'autant plus marquée que la longueur d'onde est grande. Ce dispositif permet de regrouper les postes d'expérimentation utilisant des neutrons froids dans un espace attenant au bâtiment réacteur : le « hall des guides », alimenté par 6 guides à neutrons issus des doigts de gant 8F et 9F. Outre les 9 canaux horizontaux destinés à extraire les neutrons, Orphée possède autant de canaux verticaux assurant les autres fonctions du réacteur : 4 sont utilisés pour des analyses par activation, 5 pour la production de radioéléments (iridium, tantale pour la médecine) ou le dopage de lingots de silicium (par transmutation silicium/phosphore) pour l'industrie des semi-conducteurs. S'y ajoutent les 3 canaux permettant l'implantation des sources froides et chaude, ainsi qu'un canal de réserve.

1. Le Hall des Guides en 1998.

2. Vues des guides G6, G5 et G5bis dans leur casemate.

3. Lingot de silicium irradié à Orphée ; le diamètre peut atteindre 15 cm. Le silicium dopé par les réacteurs nucléaires est destiné plus particulièrement à la fabrication des composants électroniques de puissance. Il est particulièrement recherché pour équiper des technologies d'avenir comme celles utilisées dans les véhicules hybrides.



3

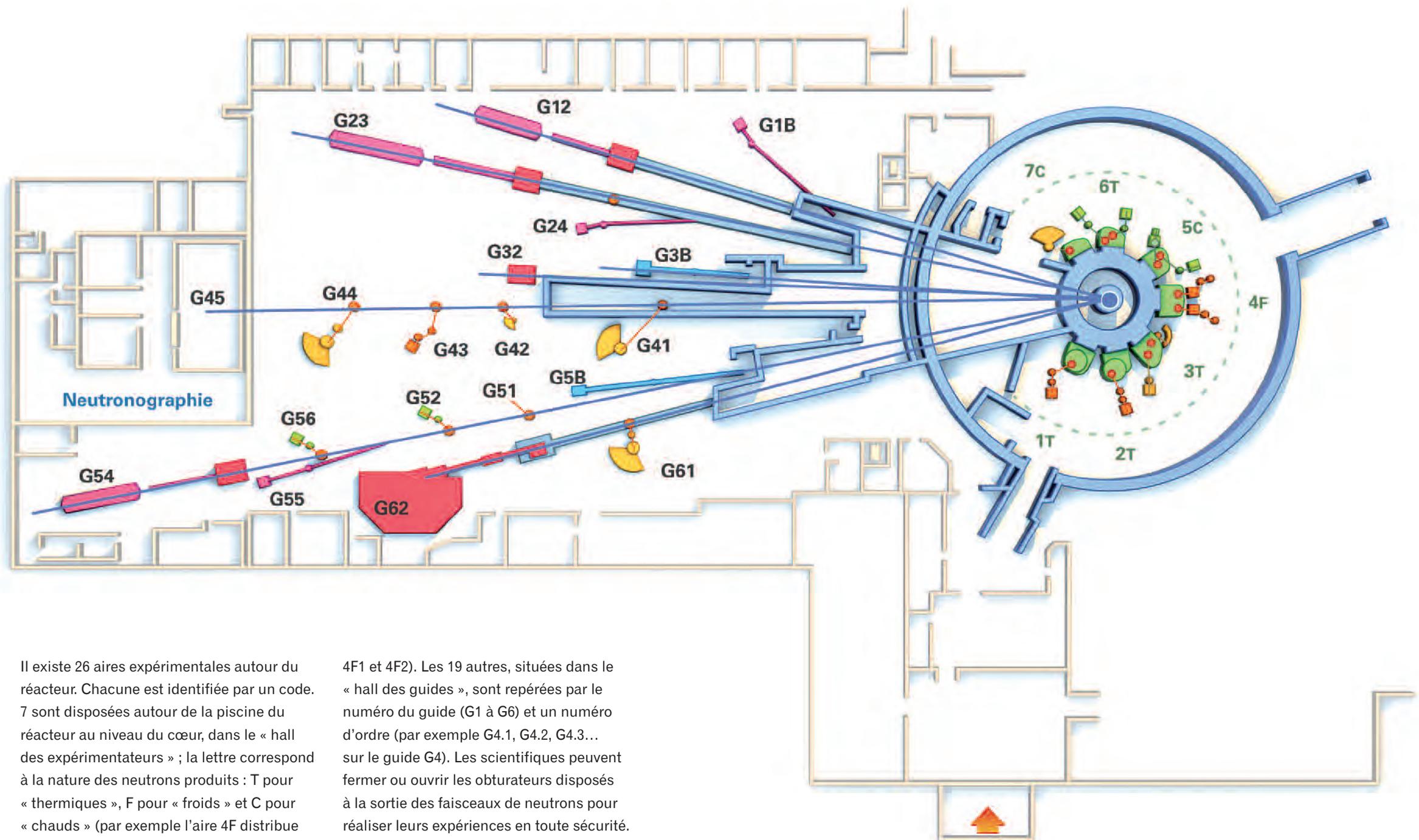
LES GUIDES À NEUTRONS

Les guides à neutrons sont des tubes creux, vides d'air, en verre épais, dont la paroi interne est polie et recouverte d'un revêtement assurant, sous certaines conditions, la réflexion des neutrons. Du fait des particularités de l'interaction neutron-matière, la différence d'indice entre le vide et le matériau réflecteur est très faible et l'angle dit « critique », sous lequel le faisceau est réfléchi par la paroi du guide, est très petit. Ce phénomène entraîne trois conséquences importantes : d'une part, les guides à neutrons sont nécessairement quasiment droits ; d'autre part, une perte de flux survient inévitablement à chaque réflexion sur les surfaces ; enfin, la transmission des neutrons de courte longueur d'onde s'avère faible.

Pour améliorer les performances des guides, il faut donc jouer sur l'angle critique du matériau réflecteur. Une fois le bon matériau trouvé (^{62}Ni , un isotope du nickel), il est possible de pousser encore les performances en faisant appel à la technologie des multicouches qui permet, grâce à un phénomène d'interférences constructives entre les ondes réfléchies par les différentes couches, de doubler voire tripler la valeur de l'angle critique. Développée par la société CILAS à partir de 1990, la technologie « Super Miroir », qui fait alterner de fines couches de nickel et de titane, s'installe progressivement sur les guides d'Orphée.

Super miroir avant son installation dans les collimateurs à l'été 2003.





Il existe 26 aires expérimentales autour du réacteur. Chacune est identifiée par un code. 7 sont disposées autour de la piscine du réacteur au niveau du cœur, dans le « hall des expérimentateurs » ; la lettre correspond à la nature des neutrons produits : T pour « thermiques », F pour « froids » et C pour « chauds » (par exemple l'aire 4F distribue des neutrons froids aux deux spectromètres

4F1 et 4F2). Les 19 autres, situées dans le « hall des guides », sont repérées par le numéro du guide (G1 à G6) et un numéro d'ordre (par exemple G4.1, G4.2, G4.3... sur le guide G4). Les scientifiques peuvent fermer ou ouvrir les obturateurs disposés à la sortie des faisceaux de neutrons pour réaliser leurs expériences en toute sécurité.



Nos yeux, les rayons X et les neutrons offrent une vision différente du même objet.

L'analyse par activation

L'analyse par activation consiste à rendre radioactifs sous flux de neutrons des échantillons qui ne le sont pas initialement puis, par mesure des rayonnements émis après irradiation, à quantifier très finement les constituants de l'échantillon. À Saclay, le Laboratoire Pierre Süe, commun au CEA et au CNRS, est spécialiste de cette technique d'analyse. Les échantillons sont placés dans des navettes qui sont propulsées dans des tubes par un système pneumatique jusqu'aux quatre logements d'irradiation en périphérie de la cuve à eau lourde. Les applications de cette technique portent principalement sur l'analyse d'échantillons d'origine archéologique ou de dosages précis dans des végétaux. Le dosage de l'arsenic contenu dans un cheveu de l'empereur Napoléon I^{er}, mort à Sainte-Hélène en 1821, a ainsi été réalisée à Orphée en 1998.



LA NEUTRONOGRAPHIE

Sur l'un des faisceaux de neutrons, le réacteur Orphée dispose d'une installation de neutronographie industrielle qui permet d'effectuer des travaux d'imagerie en neutrons à des fins de contrôles non destructifs. Les neutrons sont capables de révéler la présence de noyaux légers à l'intérieur d'autres matériaux. Cette technique est complémentaire de la radiographie dont les rayons X révèlent les noyaux lourds. Les neutrons du réacteur Orphée permettent, entre autres, de contrôler les organes pyrotechniques des lanceurs Ariane. Les activités de neutronographie dépendent de la Direction de l'Énergie Nucléaire du CEA.



1. Mise en place d'un échantillon dans l'axe du faisceau de la neutronographie industrielle.

2. Les dispositifs pyrotechniques remplissent un rôle majeur dans le fonctionnement des lanceurs comme Ariane : transmission d'information, mise à feu des moteurs, séparation des étages. Il est donc essentiel de les contrôler avant leur mise en place. Les composés hydrogénés (poudres, explosifs, matières plastiques) offrent un bon contraste en neutronographie alors qu'ils sont transparents aux rayons X.

Au service

de la physique

Comme pour tout réacteur nucléaire, la divergence d'Orphée est suivie d'une période d'essais et de mesures à basse puissance permettant de qualifier le réacteur et les sources chaude et froides. Le 17 juin 1981, la montée en puissance est autorisée et la puissance nominale de 14 MW est atteinte le 5 avril 1982.

Premiers pas

L'exploitation se met en place. Pendant les trois premières années, les cycles de fonctionnement révèlent plusieurs difficultés d'étanchéité liées aux procédés de montage et de serrage des joints métalliques des canaux et de la cuve à eau lourde. Les interventions nécessitent la construction d'outils spécialisés – notamment des engins sur coussin d'air qui interviendront sur les canaux. Ces matériels lourds, qui reste-

ront utilisables pendant toute la durée de vie d'Orphée, sont entreposés dans une extension du hall de montage.

Des opérations curatives et préventives s'inscrivent dans le planning de fonctionnement jusqu'en 1989. Elles imposent aux équipes de maintenance une grande inventivité et une parfaite technicité. Les solutions adoptées sont efficaces et, après expertise d'ensemble, l'étanchéité se trouve rétablie de manière durable.

Ces interventions ont le mérite d'attirer l'attention de l'équipe d'exploitation sur un aspect fondamental de son travail, dont l'importance



Machine d'extraction des doigts de gant.

Les cycles de fonctionnement du réacteur

Le combustible du cœur fournit environ 100 jours de puissance. Entre deux cycles de 100 jours, on procède à un remplacement complet du combustible. Cette opération et les vérifications avant redémarrage nécessitent un arrêt de quelques semaines. Un cycle de fonctionnement comprend par ailleurs un arrêt intermédiaire d'au moins 48 h pour enlever la source de démarrage. Les arrêts pour renouvellement du combustible et les arrêts intermédiaires courts permettent également la réalisation de travaux de maintenance. Pour des gros travaux de maintenance, des arrêts de plusieurs mois peuvent être programmés.



LES ÉQUIPES DE QUART, SENTINELLES DE LA SÉCURITÉ

Les règles d'exploitation indiquent la conduite à tenir en cas de problème. Face à l'imprévu, la réactivité et la compétence des équipes de quart du réacteur sont cruciales.

Il s'agit de réaliser une expertise rapide et sereine de la gravité réelle de la situation : des arrêts d'urgence intempestifs peuvent survenir. L'installation peut avoir à faire face à une perte de ses sources électriques extérieures, comme la tempête de décembre 1999 qui provoqua une heure de coupure électrique totale. Pour faire face à ce type d'événement, le réacteur est équipé de groupes électrogènes et de batteries de secours. En 1993, du BF3 (un gaz toxique) se met à fuir d'un multidétecteur de neutrons de grande dimension situé dans

le hall des guides. La fuite est immédiatement détectée et l'équipe d'exploitation fait évacuer le hall ; celui-ci est vidé de son personnel en deux minutes !

Si le besoin s'en fait sentir, l'équipe de quart devra alerter des renforts – ingénieur d'astreinte, pompiers, médecins, service de sécurité... –, accueillir les secours et les guider dans leurs missions.

Par ailleurs, des exercices de simulation de crise sont régulièrement organisés au CEA à Saclay.

La salle de conduite
du réacteur Orphée.



ne cessera de croître au cours des années 1980-1990 : la nécessité de s'assurer de la qualité parfaite des matériaux et des réalisations. On profite par ailleurs des arrêts du réacteur pour améliorer le fonctionnement des sources froides et de la source chaude et enrichir le parc instrumental en installant de nouveaux spectromètres.

Le réacteur à flux moyen le plus moderne au monde

Comme le souligne Bernard Hennion, alors chef du groupe « Dynamique » au LLB, le résultat donne pleine satisfaction aux chercheurs : « Les premières années ont été un peu chaotiques, mais il fut vite clair que nous disposions d'un outil performant, dont la compacité permettait, en ce qui concerne les spectromètres installés près du réacteur, de compenser une bonne partie de la différence des puissances entre



Accolé au réacteur Orphée, le bâtiment du LLB est inauguré en juin 1986.

Orphée (14 MW) et le réacteur de l'ILL (58 MW) ». À partir de 1986, le réacteur prend son régime de croisière. L'équipement expérimental de première génération s'achève et le dispositif général bénéficie d'améliorations régulières. Un vaste bâtiment abritant bureaux, laboratoires et salles de conférence est construit par le CEA au nord-est du réacteur, ce qui facilite le regroupement du personnel du LLB et l'accueil des scientifiques extérieurs. L'équipement informatique est entièrement renouvelé, en pilotage comme en traitement des données. Les demandes d'expériences se multiplient, atteignant même les 500 en 1991– suite à l'arrêt du réacteur RHF de l'ILL entre 1990 et 1993. L'installation fonctionne alors 250 jours par an.

Face à ce succès, les responsables d'Orphée envisagent, à partir de 1988, une extension des possibilités expérimentales, notamment dans le domaine des neutrons froids. Les premiers es-

sais de faisabilité réalisés à l'occasion de l'arrêt d'été 1990 étant concluants, un projet « Orphée Plus » est finalisé en juin 1991. Il prévoit la transformation du canal 1T en canal froid, le remplacement des deux sources froides et du cryogénérateur (qui assure la liquéfaction de l'hydrogène), la jouvence et le réaménagement du dispositif expérimental dans le hall du réacteur, la construction de 4 guides à neutrons dans un nouveau hall à l'est du réacteur, une extension du bâtiment du LLB, et, une plus grande ouverture du laboratoire aux partenaires européens. Si les pré-études débutent en 1992, le projet ne sera pas mené à son terme : le nouveau hall des guides ne verra pas le jour, en revanche, le réacteur bénéficiera de plusieurs améliorations.



LA 1^{RE} RÉÉVALUATION DE LA SÛRETÉ DU RÉACTEUR ORPHÉE

Lorsque Maurice Mazière prend, en septembre 1994, la responsabilité de l'exploitation d'Orphée, l'Autorité de sûreté nucléaire demande au CEA de réévaluer la sûreté de l'installation. « L'exploitant doit tirer un bilan complet des différents aspects du réacteur : caractéristiques générales, bilan du fonctionnement, organisation de l'exploitation, incidents et retours d'expérience, état de vieillissement des composants et des matériaux, bilans dosimétriques, répercussions sur l'environnement. On vérifie à cette occasion qu'il n'y a pas d'éléments nouveaux qui remettent en cause les démonstrations de sûreté initiales. On évalue en outre les éventuels écarts existant entre les normes de sûreté de l'époque et les règles que l'on imposerait aujourd'hui à une installation de ce genre ; il faut alors proposer des solutions pour s'en approcher. L'enjeu de cette expertise est crucial : à son terme, on a l'autorisation ou non de poursuivre

l'exploitation ! », explique Maurice Mazière. En pratique, le chef d'exploitation et les cadres travaillent pendant un an avec des experts techniques de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), chargés d'instruire le dossier. Puis ils passent devant un « groupe permanent », constitué de personnes choisies pour leurs compétences, qui examine les conclusions des expertises et accorde ou non l'autorisation de poursuivre l'exploitation – généralement assortie de recommandations. Les recommandations peuvent amener l'exploitant à réaliser des actions d'amélioration ou des travaux particuliers. Entre chaque réévaluation de la sûreté, des inspections périodiques vérifient que l'installation est exploitée conformément aux exigences d'un ensemble de documents (prescriptions techniques, rapport de sûreté, règles générales d'exploitation...) constituant le « référentiel ».

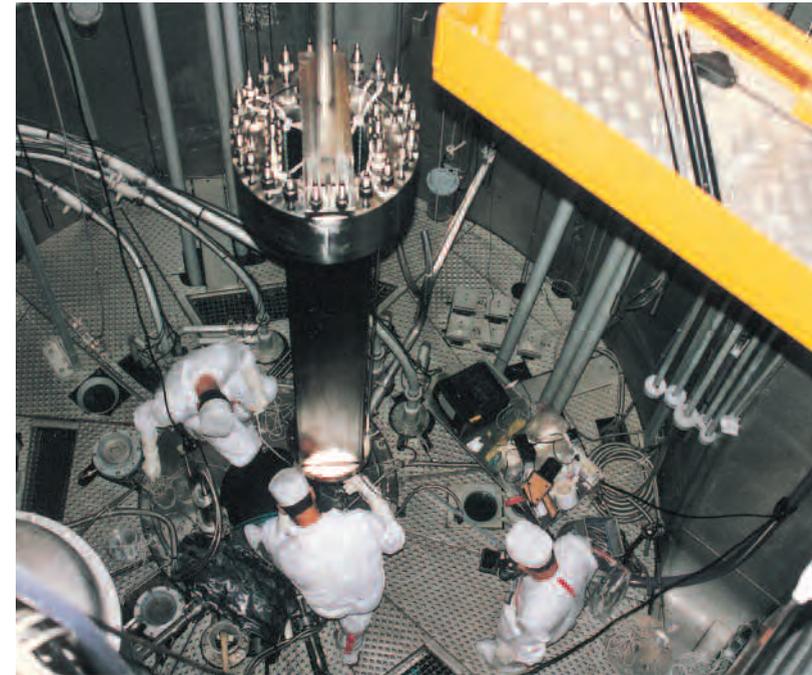
Jouvence & améliorations

On savait déjà nécessaire le remplacement de certains matériels, et on l'avait inclus dans Orphée Plus. Dans les faits, les opérations de jouvence et d'amélioration vont prendre le pas sur l'extension du dispositif expérimental.

Il faut tout d'abord augmenter les capacités de refroidissement du réacteur par les aéroréfrigérants, qui s'avèrent trop justes en conditions estivales. Dans un premier temps, en 1990, on dédouble le circuit de refroidissement en créant un circuit indépendant de refroidissement de la piscine (EZ). Dans un second temps, en 1993, on remplace les échangeurs à plaques d'origine par des ensembles plus performants et l'on ré-

nove le circuit secondaire ES, en créant notamment une centrale de contrôle de la qualité de l'eau (1993) et une station de décarbonatation de l'eau industrielle (1994).

Après dix années de fonctionnement, il faut en outre changer le cryogénérateur et le système de commande-contrôle des sources froides. On en profite pour remplacer les sources elles-mêmes et l'on installe durant l'été 1995 les sources annulaires en aluminium prévues par le projet Orphée Plus. L'amélioration est immédiate au niveau des expériences utilisant les neutrons froids, avec un gain de flux moyen de 20 % allant jusqu'à 40 % sur les plus grandes longueurs d'onde !



Mise en place du nouveau caisson cœur en 1997.

Le plus gros chantier de rajeunissement est néanmoins le remplacement du caisson cœur. À l'origine, ce caisson avait été prévu pour durer aussi longtemps que le réacteur. Mais l'un des matériaux utilisés pour sa construction, le zircaloy 2, se déforme sous l'effet de l'irradiation et les contraintes sur le couvercle de la cuve s'avèrent plus importantes que prévues, risquant de compromettre l'étanchéité du dispositif. Le remplacement doit impérativement être fait avant 1998 !

L'opération est réalisée par les propres agents d'Orphée et du CEA entre juillet et octobre 1997. « L'important était d'avoir une équipe soudée, consciente de ce qu'il y avait à faire, et possédant une bonne connaissance des lieux », souligne Jean-Louis Poinssot, chef du groupe Hall Expérimentation. « Les équipes ont montré une grande solidarité, confirme le chef d'exploitation de l'époque, Maurice Mazière. Tout le monde avait conscience que nous étions en train de sauver le réacteur. Nous savions qu'il ne fallait pas faire d'impasse. L'opération fut physiquement et nerveusement très éprouvante ! Heureusement,

nous avons bénéficié d'un remarquable travail préparatoire. Et nous avons tenu les délais ! »

Le principe de montage du nouveau caisson est considérablement amélioré : un compensateur de dilatation en acier inoxydable fait la liaison entre le couvercle de la cuve à eau lourde et la bride supérieure du caisson cœur. L'ensemble cœur – cuve – bloc tubulaire supérieur est désormais garanti pour la durée de vie du réacteur.

Un outil scientifique indispensable

Dans l'intervalle, le contexte scientifique international a évolué. Les instruments d'investigation de la matière s'enrichissent désormais de puissantes sources de rayonnement synchrotron, comme l'*European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) entré en service en 1994 à Grenoble, à proximité du RHF, et dont les moyens complètent les capacités d'investigation par les neutrons. On prévoit la réalisation d'une source de rayonnement synchrotron supplémentaire, sur le plateau de Saclay, près du centre CEA : le synchrotron Soleil, qui sera inauguré en 2006.

Dans le monde, les grands pays renouvellent

Qu'est-ce qu'une source à spallation ?

Le principe de la spallation consiste à bombarder des noyaux atomiques cibles avec des particules à très grande vitesse. Après ce choc très violent, certains constituants des noyaux cibles sont éjectés, dont des neutrons.

Pour réaliser des sources à spallation, on combine un accélérateur de protons, qui permet d'atteindre des énergies d'environ 1 GeV, avec une cible composée de noyaux lourds, comme du tungstène ou du mercure. Il en résulte l'éjection de quelques dizaines de neutrons par proton. Ce type de source est généralement pulsée et permet d'atteindre des flux de neutrons intenses (jusqu'à 100 fois le flux nominal d'Orphée à ISIS) pendant des temps très courts (quelques microsecondes).

En revanche, les flux moyens restent inférieurs à ceux des réacteurs, dont les flux continus sont plus faciles à exploiter par les scientifiques.



1. Pierre Monceau, directeur du LLB de 2003 à 2005, a été l'un des artisans de la

signature de la nouvelle convention CEA-CNRS de juillet 2005.

2. Le synchrotron Soleil à Saint-Aubin (Essonne). Un synchrotron est un accélérateur d'électrons produisant une lumière dotée de propriétés particulières, que l'on utilise pour explorer la matière.



leurs réacteurs datant des années 1950 et se dotent de nouvelles sources de neutrons performantes ; les sources à spallation, plus coûteuses mais au potentiel plus élevé, viennent concurrencer les réacteurs. La Grande-Bretagne démarre ISIS (spallation) et l'Inde Dhruva (réacteur) en 1985, la Corée du Sud Hanaro (réacteur) en 1995, la Suisse SINQ (spallation) en 1997, l'Allemagne FRMII (réacteur) en 2004, l'Australie OPAL (réacteur) et les États-Unis SNS (spallation) en 2006. À cette dernière date, le Japon est sur le point de démarrer J-Parc (spallation), et la Chine CARR (réacteur) et CSNS (spallation).

Dans ce paysage en mutation, où l'Europe de la recherche se construit, mais où les budgets de

la recherche fondamentale sont contraints, la question du maintien simultané de deux sources de neutrons en France, le RHF et Orphée, va être posée. Chacun est cependant conscient de l'impact qu'aurait la disparition d'Orphée, à la fois pour la communauté scientifique française (les accès aux moyens expérimentaux nationaux se partageant de manière à peu près égale entre le RHF et Orphée) mais aussi pour la communauté internationale, (Orphée, à la pointe dans plusieurs domaines scientifiques, accueille chaque année près de 500 visiteurs de tous pays). Dès 1997, une première expertise commandée à un groupe *ad hoc*, présidé par l'académicien Roger Balian,

L'amélioration des faisceaux et de l'équipement scientifique

Sur une installation comme Orphée, les gains en neutrons se font davantage sur leur collecte, leur transport et leur utilisation que sur la source elle-même (le réacteur). L'abandon dans les années 1990, faute de source de financement, des extensions d'Orphée Plus débouche sur un projet de jouvence du dispositif expérimental : augmentation de la taille des faisceaux par le changement des canaux 8F et 2T, remplacement de guides à neutrons par la nouvelle génération équipés de Super Miroirs, développement de dispositifs de focalisation de neutrons, construction de nouveaux spectromètres, rénovation des anciens, amélioration de l'environnement des échantillons. Ce programme, réalisé entre 1996 et 2001, a été poursuivi à partir de 2005 par un nouveau programme d'évolutions instrumentales.



L'augmentation de la taille du faisceau 2T en 1999 : mise en place du nouveau bouchon.

recommandait d'ailleurs « de maintenir dans la prochaine décennie l'accès de la communauté française aux deux sources restantes [...] sinon des pans entiers de la recherche seraient sacrifiés. »

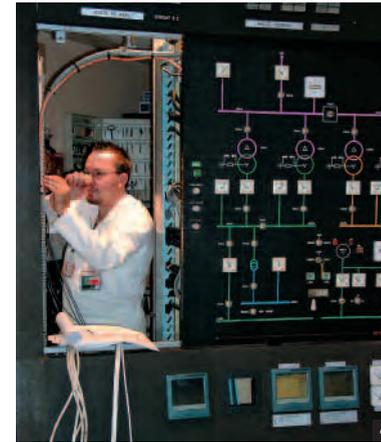
Néanmoins, entre 2003 et 2005, l'avenir du réacteur va être incertain. Soumis à des restrictions budgétaires, Orphée passe en fonctionnement réduit dans l'attente d'une décision définitive des autorités de tutelles – mais avec le souci de maintenir l'activité scientifique à un niveau correct. « Ce fut une période délicate », souligne l'ingénieur Franck Pillot. « Orphée a été mis en sommeil. Il a fallu se séparer de plusieurs personnes, baisser les coûts de fonctionnement. Le nombre d'équipes de quart a été réduit de 6 à 5. Cela a imposé d'adapter les cycles de fonctionnement du réacteur et le planning de rotation des équipes. Durant les années 2004 et 2005, Orphée n'a fonctionné que 114 jours par cycles de 19 jours ! Paradoxalement, nous avons dû gérer un surcroît de travail ! ».

Les utilisateurs scientifiques et industriels font part de leur soutien. Le personnel se mobilise. Des élus locaux soutiennent le réacteur. Les réunions CEA/CNRS se multiplient dans un souci de convergence. Suite à une dernière évaluation, confiée en juin 2004 par le ministère de la recherche au Haut-Commissaire du CEA, le ministre de la Recherche confirme, en septembre 2004, au CEA et au CNRS, l'avenir du réacteur. La nouvelle convention CEA/CNRS signée en juillet 2005 marque le retour à 180 jours (au moins) de fonctionnement annuel.

En 2006, la célébration des 25 ans d'Orphée est l'occasion de tracer les nouvelles perspectives, en tenant compte des grands pôles européens voués à l'exploration de la matière : ILL/ESRF à Grenoble, ISIS/Diamond en Angleterre, SINQ/SLS en Suisse, HMI/BESSY II en Allemagne, et, désormais, Orphée/Soleil sur le plateau de Saclay. Orphée fonctionne près de 200 jours en 2007.

Se trouvent ainsi confirmés la bonne conception initiale de l'installation, ainsi que son potentiel d'utilisation et d'adaptation. Orphée fera entendre son chant de longues années encore.





1 et 2. Le groupe mécanique : maintenance des ventilateurs, modification du circuit d'air comprimé.

3 et 4. Le groupe électrotechnique : refonte d'armoires en atelier, essais avant mise en place ; reprise de câbles d'alimentation.

5, 6 et 7. Le groupe contrôle-commande en salle de conduite du réacteur avec les équipes de quart ; mise au point d'une nouvelle chaîne de mesure au laboratoire d'électronique.

8, 9 et 10. Le groupe Hall : manutention en piscine, intervention sur la machine de découpe sous eau et remontage de la bride de maintien 8F pendant le chantier 8F - 9F en 2003.

