

Rapport International sur le Laboratoire Léon Brillouin*

La mission d'évaluation des performances et perspectives du Laboratoire Léon Brillouin travaille depuis début septembre. Elle est composée de :

Massimo ALTARELLI, premier directeur scientifique de l'ESRF, aujourd'hui responsable du Synchrotron Elettra de Trieste. Il nous apporte sa longue expérience de l'articulation neutrons/rayons X.

Jean ETOURNEAU, chimiste de Bordeaux, qui connaît de l'intérieur le rayonnement du LLB sur la communauté nationale.

Henry GLYDE, patron de la physique à l'Université de Delaware, spécialiste des liquides et solides quantiques, familier de l'ILL.

Jean Pierre HANSEN, Professeur de Chimie Théorique à Cambridge, expert des liquides et autres " matières molles ".

Feri MEZEI, Professeur à Berlin où il anime la physique autour du réacteur HMI. A l'origine de nombreuses techniques de pointe en neutronique, il connaît très bien la communauté française du fait de son long séjour à l'ILL.

Dieter RICHTER, de Jülich, l'un des acteurs majeurs de politique neutronique en Europe, grand expert de l'application des neutrons en matière molle et biologie.

Les questions posées au départ étaient les suivantes :

- (i) Quels sont les points forts de l'activité du LLB ? Dans quels domaines est il au premier rang ? Quelles sont les expériences qui peuvent seulement être faites là ?
- (ii) Quelle est l'articulation entre le LLB et l'ILL ? Faut il considérer le LLB comme l'endroit où l'on développe des expériences nouvelles avant d'aller *in fine* à l'ILL ? Faut il le considérer au contraire comme un lieu d'innovation où l'on dispose du temps nécessaire pour essayer et tester des projets ambitieux ?
- (iii) Plus généralement, a t-on besoin d'une source de neutrons nationale? La comparaison avec les autres pays européens est à cet égard instructive. La question est *quantitative* (l'ILL ne suffit pas aux besoins), et *qualitative* (la physique des neutrons ne s'épanouira en France que si l'on forme des physiciens des neutrons).
- (iv) Quel est l'impact du LLB sur la scène scientifique française et dans les autres pays européens (Italie, Allemagne, Royaume Uni, ...). La présence de contacts locaux plus disponibles permet elle une meilleure collaboration avec les utilisateurs ?
- (v) Par delà la physique, quel est l'impact du LLB sur la chimie, la biologie, etc...?
- (vi) Comment le LLB s'intègre t-il dans le paysage général des grands instruments?

La discussion a été menée par mel, chacun contribuant des textes sur un sujet donné envoyés à tous les autres. Ceux d'entre nous qui connaissaient mal le LLB l'ont visité pour prendre contact avec les chercheurs et mesurer la qualité de leurs projets. Cette méthode de travail a très bien fonctionné: un consensus s'est très vite dégagé.

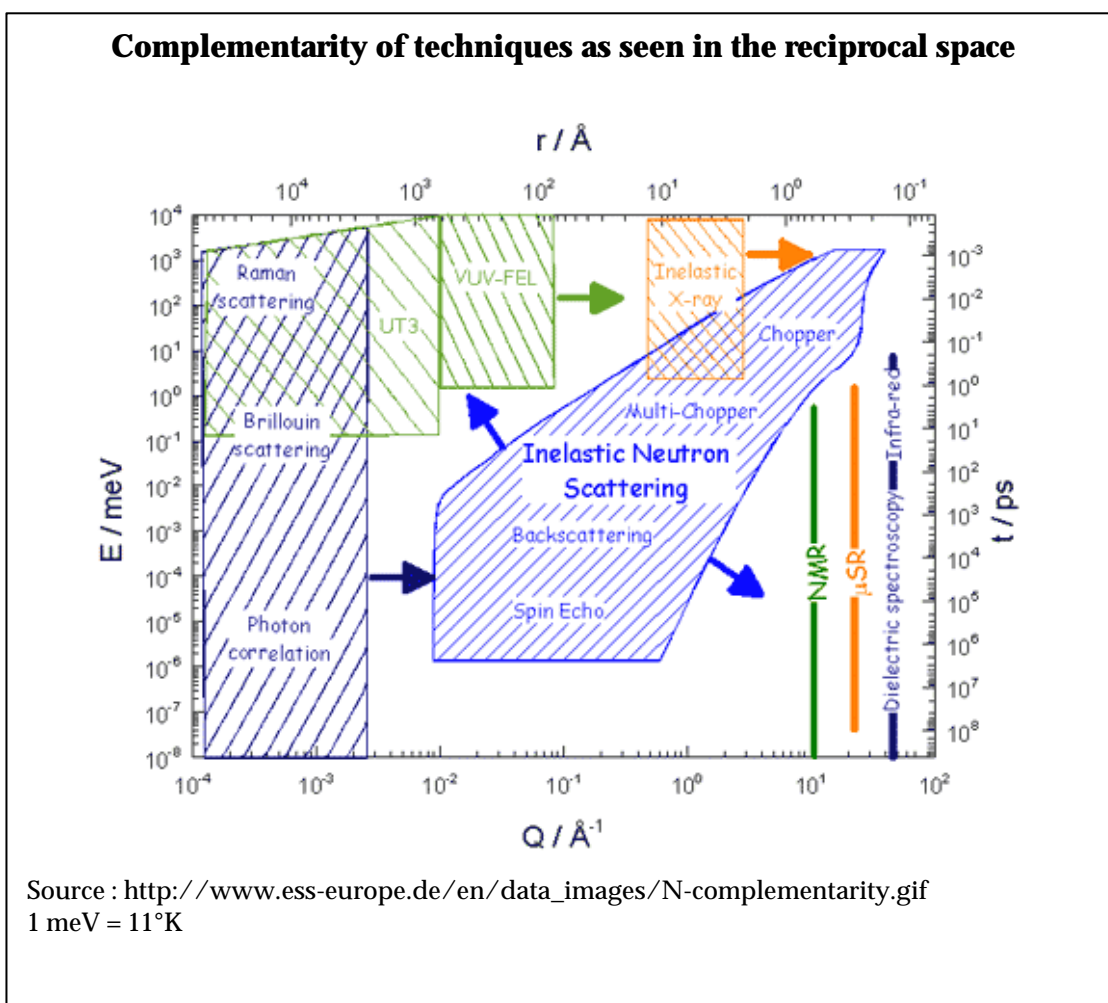
* Présenté au Conseil Scientifique du CNRS le 17 novembre 2003

Il m'a paru préférable de conserver les textes originaux, dûment amendés, dont la spontanéité est plus convaincante. Ils sont reproduits ci dessous en italiques, structurés par un commentaire de synthèse.

1) POURQUOI DES NEUTRONS ?

Les arguments classiques sont bien connus: sonde faiblement couplée qui ne perturbe pas l'objet étudié, pénétration aisée en volume, sensibilité aux degrés de liberté magnétiques (ce sont les neutrons qui 20 ans après ont confirmé l'existence de l'antiferromagnétisme de Louis Néel!). Les neutrons thermiques ont une faible énergie et se prêtent donc parfaitement à l'étude des excitations élémentaires (pour citer une fois encore la grande histoire, l'observation directe des phonons et rotons de Landau dans ^4He superfluide a été une étape majeure). Pendant longtemps les neutrons avaient le monopole de ces deux domaines, magnétisme et dynamique locale. Ils sont aujourd'hui concurrencés par d'autres techniques. La diffusion des rayons X permet d'accéder aux structures magnétiques, le dichroïsme circulaire ouvre de nouvelles perspectives. La RMN donne des renseignements précieux sur les structures et la dynamique locale. La précession des muons, leur résonance et leur relaxation, donnent accès à de minimes variations de champ magnétique local. Notons que l'exploitation de la RMN et des muons est souvent indirecte alors que les neutrons donnent une imagerie directe dans l'espace réciproque.

En fait toutes ces techniques ne sont pas vraiment en concurrence: elles sont *complémentaires* car elles couvrent des échelles d'énergie et de dimension très différentes. On peut illustrer cette compétition dans le plan " q, ω ", transferts de moment et d'énergie. Chaque méthode a sa niche, par exemple les hautes énergies pour les photons X, les très basses énergies pour la RMN. La figure jointe montre clairement que les neutrons sont seuls en lice dans la région intermédiaire, $q \sim 0,1-1 \text{ \AA}^{-1}$, $\omega \approx 10-100^\circ\text{K}$, la plus importante pour la



majorité des problèmes de matière condensée. Les neutrons sont donc irremplaçables. Mais il ne faut pas être impérialiste: la confrontation des différentes méthodes est extrêmement enrichissante, elles se fécondent l'une l'autre. Je préfère laisser la parole à Massimo Altarelli, orfèvre en la matière :

The Saclay area, with the presence of the LLB and soon of the SOLEIL synchrotron, has the potential to become a centre of excellence for some important areas of condensed matter science: structural and electronic properties of solids, magnetic structure and excitations, physics of materials under high pressures, to mention just those I am most familiar with. The very good people present at and around the LLB and their research programs should be regarded as an investment which is now about to produce an even greater pay-off when SOLEIL starts its operation, and vice-versa. The complementarity between neutrons (sensitivity to light atoms, ability to probe excitations, large penetration power) and x-rays (sensitivity to surfaces, possibility to investigate small samples, chemical sensitivity via resonance on core level energies) produces an effect of cross-fertilization which is well documented by examples throughout the world: starting from the very good research record of Brookhaven National Laboratory (where the reactor used as neutron source is now closed for ill-conceived environmental reasons that have little to do with the scientific productivity) and Argonne National Laboratory in the US, continuing with the more familiar examples of the ESRF-ILL in Grenoble, of the Swiss Light Source coupled to the SINQ spallation source at the Paul Scherrer Institut in Switzerland, and projected into the future by the decision in the UK to build the Diamond 3rd generation synchrotron source next to the ISIS neutron spallation source.

Neutrons and x-rays are different complementary tools to investigate the same materials and the same scientific problems. Consider the example of high temperature cuprate superconductors: synchrotrons delivered all the important information about the structure of the Fermi surface and of the superconducting gap, whereas neutrons were indispensable to map out the magnetic excitations. It is very fruitful for people interested in the electronic properties of cuprates and using one or the other probe to meet, to discuss among themselves and even better with theorists, if they also are around. Similarly, as far as the structural properties are concerned, x-rays can map out the structure starting from much smaller crystals, if larger ones are not available; however neutrons can allow a much better refinement of the position of oxygen atoms, which are obscured in x-ray crystallography by the heavier atoms such as Bi, Ba, La, Y, Tl...

The case of structural properties is in a sense even more compelling for the following reason: in the case of electronic properties, the experimental technology necessary to perform modern photoemission experiments (ultra-high vacuum, electron energy analysis by sophisticated electron optics lens systems,...) is very different from that used in the inelastic neutron scattering that probes magnetic excitations. Therefore it is very unusual that the same person is actively taking part in both kind of experiments. This is on the other hand very often the case among crystallographers, among people interested in the magnetic structures, or in the physics of materials under high pressures. The proximity of a neutron and an x-ray source is a major attraction factor for these communities and the synergy effect is very visible, e.g. in Grenoble. The extraordinary development of x-ray magnetic scattering at ESRF owes a lot to the pre-existing magnetic neutron scattering community around ILL.

Il serait totalement absurde d'opposer neutrons et photons X: au contraire, c'est leur conjonction qui permet d'avancer.

Les neutrons ont un autre atout, leur sensibilité aux atomes légers (peu visibles aux rayons X), et en particulier les grandes différences de diffusion pour les isotopes d'un même élément. L'exemple extrême est l'hydrogène: le proton a une forte diffusion incohérente, la substitution H/D est une technique usuelle pour augmenter la diffusion cohérente. Cette différence devient précieuse en milieu aqueux. En jouant sur la composition isotopique du solvant, H₂O/D₂O, on peut contrôler le contraste du solvant avec les objets dissous. et réduire

d'un facteur 10 le fond de diffusion, faisant ainsi émerger les détails que l'on a déduits. Cette méthode de substitution isotopique est parfaitement adaptée au monde biologique, où les objets sont complexes et les protons omniprésents. Je laisse parler Dieter Richter

Dealing with these complex many component mixtures of soft matter and soft matter biosystems, neutrons play an extremely important role. Neutrons access the proper length and time scales on a molecular scale and even more importantly the possibility to perform contrast matching make neutrons an invaluable tool to access key components in such systems which often are crucial for the physical behaviour of a given composite. The dynamic dimension in biosoft materials again may be accessed with neutrons on labelled materials. Recently some very nice work by the Saclay group on the dynamics of proteins was published. Here the combined neutron scattering approach together with simulations is often decisive. Looking into the last LLB report it is obvious that both in the field of soft matter science, in particular polymers, as well as in biomaterials a very significant number of important publications are visible.

Il est donc clair que les neutrons n'ont rien perdu de leur pertinence. Les techniques expérimentales ne cessent de s'améliorer (et permettent de travailler sur des échantillons plus petits). Le LLB n'est pas à la traîne en la matière: il est au contraire en pointe dans de nombreux domaines, en particulier en réflectométrie et dans l'expérimentation aux conditions extrêmes, par exemple aux hautes pressions (500kbars à 8 teslas et 0,1°K!) Nous y reviendrons plus loin.

2) UN PANORAMA DES NEUTRONS EUROPEENS

L'ILL est la référence mondiale en matière de réacteur. De même ISIS est la source à spallation la plus puissante disponible. Les deux techniques sont souvent complémentaires. En dehors de ces deux équipements de pointe il existe un réseau de sources régionales de moyenne puissance

- En Allemagne Munich FRM2 tout neuf, Berlin HMI et Jülich FRJ2 vieillissant
- En Suisse la source à spallation continue SINQ
- En France Orphée au LLB

Il faut y ajouter des réacteurs plus petits à Delft, Budapest, etc... La question immédiate est la pertinence de sources régionales face aux sources généralistes que sont ILL et ISIS. A plus long terme, quelle est la politique européenne de développement des neutrons? Je laisse la parole à Dieter Richter, étroitement lié à l'élaboration de cette politique européenne: son jugement ne peut pas être taxé de chauvinisme! L'articulation ILL/LLB qui nous concerne sera reprise au paragraphe suivant.

*Let me start with the global neutron strategy which was set up by the OECD Megascience Forum and which was endorsed by the OECD conference of research ministers in 1999. Commissioned by the OECD Megascience Forum a neutron working group with participant from eighteen different OECD countries explored global scenarios for neutron research. The main recommendation which is important for our case, was the outcome for a third generation neutron source to be build in each continent (like the SNS in the United States or J-PARC in Japan), together with the recommendation **"that the new advanced sources be supplemented by network of new and/or upgraded existing sources as required to serve both regional and national science and technologic needs. In each case the justification for the operation of such sources should be on the basis of excellence in science, in technology that is being supported, etc."***

The recommendation that sustainable neutron research requires both a large top rank facility and a network of excellent medium sized sources supporting them is well founded. There does not exist a laboratory based neutron camera like it is the case for X-rays. Neutron research requires a large facility

to be performed. In the OECD recommendation it is also said, that "the network of well equipped intermediate size sources is needed to serve national communities as home base for the large class of experiments which do not need the highest flux and for the development of new techniques". Furthermore educational aspects play an important role. Again the OECD recommendation says "more than half of the neutron researchers are PhD students and Postdoctorals, who in addition to carry out frontline research are being educated in the international environment of the large neutron establishment thereby preparing them for the challenges of professional activity in an increasingly global scientific and industrial world"....

In an OECD sponsored in depth study on the performance and the future perspectives of the OECD neutron sources, a careful evaluation and a ranking of the facilities has been performed. Combining the neutron flux provided by the facility, the instrumentation as well as considering special characteristics of pulsed sources, figures of merits for the different facilities were introduced and widely accepted by the Megascience Forum experts. Though in detail these figures need to be slightly revised, their general validity is still undisputed. According to this evaluation the European medium flux reactors have the following figures for merit.

HMI (Berlin)	40
FRJ-2 (Jülich)	40
FRM-2 (Munich)	61.2 (with 17 scattering experiments)
SINQ (Switzerland)	32.5
ORPHEE reactor (Paris)	70

For comparison the ILL features 134.4 and ISIS 70.3. From this evaluation it is clear that in terms of figures of merit the LLB installation with its large number of scattering instruments is aside of the FRM-2 in Munich, the leading medium flux facility in Europe. It is significantly surpassed only by the ILL.

Considering this standing of LLB within the European network of neutron sources it is natural to conclude that LLB is one of the cornerstones of this network. Its further operation will be crucial to support a sustainable development of European neutron research. This is even more so since the next generation neutron source which was expected to be decided positively this year is now delayed for a longer period. Thus, LLB serves as a home base for the French neutron community, it provides access for many European users, who are supported by the European access program, to carry out experiments which do not need the highest flux, it fosters education of PhD-students and Postdocs and it supports instrument and methods development. Without LLB the excellence in neutron science will suffer strongly and the most efficient use of the ILL will be severely endangered.

Cette conclusion se passe de commentaire : le LLB joue un rôle central sur la scène européenne

3) LA PLACE DU LLB EN FRANCE

Il faut redresser une idée fausse souvent répandue, selon laquelle le LLB serait un second choix de l'ILL. C'est quantitativement faux! Si on mesure la capacité d'un réacteur en "jour-instrument", le rapport LLB/ILL est $\sim 0,8$. Le LLB est donc plus petit que l'ILL, mais du même ordre de grandeur. En fait ce chiffre est trompeur: il faut tenir compte du flux ! Tant que l'on sort un signal du bruit de fond, on peut compenser un flux plus faible par un temps de mesure plus long (on fait moins d'expériences !). Mais ce n'est pas toujours possible, pour des raisons diverses : le véritable atout d'un haut flux est la sensibilité. Dans des conditions extrêmes, l'ILL est donc irremplaçable. Mais toutes les conditions ne sont pas extrêmes : il faut une analyse qualitative plus fine pour dégager l'articulation des deux instituts et leurs parts

respectives dans la neutronique française. Je préfère pour cela laisser la parole à Feri Mezei, a priori plus tourné vers l'ILL que vers le LLB, mais qui a une vue d'ensemble de toute la communauté neutronique mondiale:

I would like to recall a few statistical facts (referring to years 1998-2000), which help to find answers to these questions:

- a) *The number of publications in refereed journals based on work done at LLB is about 50% of that of ILL (while LLB provides 77% of instrument-days of ILL)*
- b) *The fraction of high impact publications (PRL and similar) in the total are very similar for LLB and ILL*
- c) *In terms of yearly budget per publication, LLB is slightly cheaper than ILL (80 keuro vs 111 keuro, budget figures from year 2000)*
- d) *To the extent scientific results can be attributed to national origin, yearly about 200 neutron scattering publications by primarily French researchers are produced at LLB against some 150 at ILL (not counting the use of the 2 "private" CRG instruments separately funded and operated by the CEA Grenoble at ILL)*

When they can technically compete, LLB and other centers of similar power produce the same quality of science as ILL. Some experiments, that require the best available flux or instruments with unique parameters, can only be done at ILL. For the same matter, there is a small number of experiments which are feasible at LLB and cannot be done at ILL, namely experiments at the highest pressures available in neutron work. Some LLB instruments may for a while outperform their ILL counterparts in a number of applications. A notable example was Triple-Axis-Spectroscopy, which explains the high impact of LLB work in high Tc stuff.

I would estimate, that about 20 % of the user experiments, in cases where similar instruments and sample environment are available on both sides, really require ILL. The rest can be done at medium flux sources, typically in somewhat longer time. The fraction of experiments that are first prepared at LLB or similar places and then done at ILL is even less, probably under 10 % of the activity at LLB. ILL has played and still plays a key role in instrument development. LLB also does, but in different fields. For example LLB was pioneer in neutron reflectometry, while the ILL missed that boat for many years. The style of innovation is different at ILL and the smaller centers: ILL often pursues elaborate technology that requires considerable resources and expertise, while the smaller centers go for the unusual, highly risky, less costly. Successful innovations, once established and accepted (10 years at least) spread reasonably over all centers. Altogether a significant part of innovation is driven by combined effort of the smaller centers: more people, more time. In the training of young people, LLB does a lot more than ILL, by their very nature.

In sum: the french part of ILL + the CENG group with its two CRG instruments, on the one hand side, and LLB, on the other, represent comparable scientific power, output and quality. There is a strong complementarity in innovation, scientific expertise, role in training between these two halves of French neutron research, with quite some overlap in the experimental capabilities. The role of work at LLB as preparatory for completion at ILL is marginal, the two rather function at the same scientific level, while doing in many respects different things.

J'ajoute à cette analyse très fouillée quelques commentaires personnels. Le service de "local contact" est pour les physiciens de l'ILL une charge très lourde. De ce fait ils sont souvent débordés. A l'inverse les physiciens du LLB ont plus de temps à consacrer à leurs utilisateurs extérieurs. Le rapport visiteur/physicien est plus faible, les expériences durent plus longtemps : les néophytes peuvent s'initier aux difficiles techniques de la neutronique. Il n'y a là aucun jugement de valeur : l'ILL est avant tout un institut de service, le LLB un laboratoire de recherche. Cette disponibilité est essentielle pour les biologistes et les chimistes, comme le souligne Jean Etourneau. Les chimistes du CNRS utilisent à eux seuls 27% du temps de faisceau du LLB. Ils y nouent des collaborations étroites, ils ont des thésards en commun, ils peuvent tenter des développements risqués qui trouveraient moins bien leur place dans un plan

de charge saturé. C'est le privilège des petits centres. La situation est résumée par la phrase d'Etourneau

The missions of both LLB and ILL are apparently the same but we should distinguish these two Centers by trying to answer the following questions:

- *In which Center the availability of the permanent staff is largest ?*
- *In which Center can we develop specific or risky researches asking sustainable actions and programmes ?*
- *In which Center can we really send researchers for a sound training in the use of neutron facilities in the field of Materials Chemistry Materials Science ?*
- *In which Center the access for industrials is the easiest ? This point should merit a special attention.*

According to my opinion the missions defined in the questions raised above are better fulfilled by LLB.

Je suis personnellement convaincu que le LLB est le terrain qui forme la plupart des neutroniciens français. Il suffit de voir le nombre de thésards qui tournent en permanence, qui viennent y apprendre le métier et qui deviendront demain les utilisateurs de l'ILL (et du LLB). Un chiffre qualitatif est éloquent : il est passé en 10 ans au LLB 1000 utilisateurs nouveaux, soit une rotation de 100 « débutants » par an – pour l'essentiel des thésards venus de l'extérieur. Si demain on ferme le LLB la population des neutroniciens français s'étiolera rapidement. C'est aussi l'avis de Massimo Altarelli:

Based on my experience with large facilities, in the long term the quality and quantity of ILL French users would be reduced, if the LLB would no longer be available. This may seem a paradox, but it would happen as a consequence of the reduction of the size and attractiveness of the neutron community. For example, the program of the European Union that supports the access of non-Italian users to the Elettra synchrotron source is mostly used by German, British and French scientists, although it was originally devised by the EU to provide access to light sources to the scientists from countries which do not have their own facility. However the community of users never existed in such countries, whereas it is large, very competitive and increasingly "photon hungry" in countries where synchrotron light is presently available.

4) LES POINTS FORTS DE LA SCIENCE AU LLB

Le LLB a une longue tradition dans le domaine des ondes de densité de charge, appuyée sur les travaux théoriques d'Aubry. Je ne citerai qu'un exemple, les manganites, par exemple, où l'affinement des structures a permis de comprendre la nature de l'appariement : il se forme des paires Mn-O-Mn qui partagent un électron et non une disproportion de valence Mn^{3+} - Mn^{4+} comme on le croyait. Ce couplage de double échange médié par l'oxygène correspond à l'image du polaron de Zener: il renouvelle la compréhension de ce type de matériaux.

Peut être parce que c'est mon domaine, je suis particulièrement impressionné par l'oeuvre du LLB en magnétisme et supraconductivité. C'est là qu'a été découvert par Rossat Mignot en 1991 le mode résonnant magnétique des supraconducteurs à haut T_c qui constitue aujourd'hui un des ingrédients essentiels du problème. Cette impulsion initiale s'est considérablement développée: par la qualité de son instrumentation, le LLB reste en pointe dans l'étude de ces excitations magnétiques. Selon Ch. Varma (qui participait au jury d'habilitation de P. Bourges), le LLB fait le travail le plus sérieux dans ce domaine. Les publications récentes dans des revues prestigieuses (Nature 1999, Science 2000, 2002, PRL 2000,2001,2002) donnent une mesure de l'activité présente du laboratoire. Notons que certaines de ces données sont acquises à l'ILL, mis à contribution lorsque le LLB est impuissant.

L'activité de ce groupe ne se limite pas aux supraconducteurs à haute température: sa virtuosité expérimentale trouve des applications dans bien d'autres matériaux, par exemple CuGeO_3 où des précurseurs inattendus à l'instabilité de "spin-Peierls" ont été découverts, dans les manganites où l'on observe des gouttes magnétiques, dans les ruthénates supraconducteurs du type Sr_2CuO_4 où apparaissent des fluctuations magnétiques incommensurables. Dans ce foisonnement de matériaux et d'effets nouveaux le LLB est unanimement reconnu comme un acteur majeur.

La physique des théoriciens est une chose, la réalité expérimentale est un art plus difficile. La qualité d'un laboratoire se mesure aussi à sa capacité d'innovation, qu'a illustrée la grande époque de l'ILL. Avec des moyens beaucoup plus modestes, le LLB reste parfaitement compétitif au plan international, ouvrant souvent des voies originales. Un exemple typique est la réflectométrie, adaptée à l'étude des profils de magnétisme en surface (distribution spatiale et orientation): la rénovation d'EROS augmentera considérablement la sensibilité et en fera l'un des meilleurs instruments mondiaux. On peut faire la même remarque pour la diffusion aux petits angles ou la spectroscopie de temps de vol où les progrès en cours ouvrent un monde nouveau aux biologistes. Qu'il soit permis au théoricien que je suis d'attirer l'attention sur un aspect moins spectaculaire, mais qui me paraît le germe d'applications très importantes: le développement d'une neutronique "sous contrainte externe". Ce peut être l'étude d'un liquide en écoulement de cisaillement, la clef pour comprendre la rhéologie d'un système complexe. Ce peut être la neutronique sous haute pression: on peut agir sur les transitions de phase "à la main", au lieu de refaire à chaque fois un échantillon de concentration différente. Marier la puissance de l'outil neutronique avec ces conditions extrêmes ouvre un champ fascinant. Le LLB occupe à cet égard une position unique. La cellule haute pression qui y fonctionne actuellement est un véritable tour de force technique, montant à 500kbar, dans un environnement qui peut atteindre 8 teslas ou $0,1^\circ\text{K}$. Il me paraît évident que cette activité va exploser dans les années à venir.

La physique des matériaux n'est bien sûr qu'un des aspects de la neutronique, relativement établi. L'application à la matière molle, à la chimie, à la biologie est plus récente : elle va vite devenir la plus importante. Les échelles de longueur et de temps des neutrons sont parfaitement adaptées à ce monde multiforme. Ici encore le LLB n'a pas raté le train: il est déjà un acteur reconnu. Conscient de mon ignorance, je préfère laisser parler les experts, d'abord Jean Pierre Hansen pour les liquides:

The study of liquid matter, encompassing "simple" and supercooled liquids, fluid interfaces, "complex" fluids, soft matter and supramolecular aggregates of biomolecules, is of crucial importance for a more quantitative understanding of complex biomaterials, from small peptides and small proteins, to membranes and the structure of entire cells. The traditional distinction between "simple" and "complex" fluids is by now obsolete, since experimental (in particular neutron scattering) and theoretical (statistical mechanics) techniques, initially developed for, and applied to the former, have been successfully extended to the latter. Moreover, in considering biomolecular assemblies, it has become increasingly clear in recent years that the structure and dynamics of large molecules in solution and of self-assembled entities are intimately coupled to those of the aqueous solvent, as emphasized by the importance of hydration effects, hydrophobic interactions and the like. From its early days, LLB has played a key role in the continuous progress of our understanding of liquid matter, and in particular of water and polymer solutions or melts. A careful examination of the more recent scientific output (in particular as described in the latest biannual report) shows that the liquids and soft matter groups at LLB have closely followed and sometimes initiated current developments of neutron scattering applied to increasingly complex systems, and that their work is at the cutting edge of significant progress at the national and international level. An incomplete enumeration of salient results includes:

- *The exploration of elementary excitations of superfluid He in confined geometries.*
- *The structure and dynamics of water at interfaces and in porous media, the characterization of microphase separation in confined binary liquid mixtures and of polymer conformations in pores.*
- *The influence of high pressures and of ageing on the structure of glass-formers.*

- The characterization of shear-induced nematic ordering of liquid-crystalline polymers, and related rheological investigations.
- A detailed study of the self-assembly of rod/coil block copolymers.
- A quantitative exploration of the persistence length of polyelectrolytes, providing one of the first verifications of Odijk-Skolnick-Fixman theory.
- The structure and solubility of complex binary charged systems, involving polyelectrolyte chains and ionic micelles or proteins; this is a particularly "hot" topic, involving both fundamental aspects (charge screening and over-screening) and industrial (detergents) as well as biological applications.
- The structure of topologically constrained supercoiled DNA.
- Several important studies involving the individual or collective behaviour of proteins. These include a study of the effect of salt on the misfolding (collapse) of high molecular weight proteins (exhibiting the theoretically predicted "necklace" conformations), the diffusion of globular proteins in crowded solutions, and the influence of hydration on the dynamics of the protein backbone and side-chains.

These selected topics show that the "liquid matter" groups at LLB have successfully diversified their interests, and are making truly significant contributions to the fast-growing field of complex fluids and their biophysical applications, in close collaboration with excellent teams from inside and outside France. One of the strengths of LLB teams is to combine the full variety of neutron-based techniques with other, complementary experimental tools, both in-house, and in collaboration with external teams (static and dynamic light scattering, synchrotron radiation, NMR, fluorescence, Raman and other optical spectroscopies, TEM, etc.), as well as with numerical modelling (in particular Molecular Dynamics). LLB is also an international leader in combining neutron scattering with the application of external stimuli, like high pressures and flow. Such concerted studies will be increasingly developed in the future, in order to enable the unravelling of complex behaviour, involving multiple length and time scales. Through their network of external collaborators, LLB teams are well prepared for further extensions of such ventures involving multiple techniques. In disentangling complex structures involving several macromolecular species, molecular solvents and ubiquitous microions, the contrast variation allowed by isotopic substitutions make neutrons the tool "par excellence" among the many available scattering and microscopic techniques. The collective know-how of LLB teams in handling contrast variation will allow them to remain at the forefront of the exploration of liquid matter.

LLB is increasingly turning its attention to biomolecular systems, and some of the results obtained so far are very promising. In particular the work on protein structure and dynamics is highly significant. The knowledge transfer to and from the large life sciences community is facilitated by the GDR "Fonction et Dynamique des Macromolécules Biologiques", which provides an excellent Forum for such exchanges, although further efforts will be needed to convince many molecular biologists (who routinely use X-rays and NMR) of the advantages of neutron techniques. One of the extensions of the current work at LLB could be to proteins embedded in membranes (including ion channel proteins), the importance of which is highlighted by this year's Nobel Prize in Chemistry. Other potential applications of neutron scattering is to DNA/ligand and DNA/protein complexation. LLB teams are in a good position to embark on such ambitious projects.

The strengths of the liquid matter research at LLB may be summarized as follows:

- Skilfull combination of neutron scattering with complementary experimental techniques to increase the range of accessible length and time scales.
- Research ranging from fundamental aspects to technological applications.
- A good coupling with modelling and simulation.
- A good network of external collaborators from competitive institutions.
- Excellent training provided for PhD students. This last aspect has been stressed by other panel members. Having a high quality neutron source in the Paris area is particularly important because of the proximity of many first-rate laboratories working on liquids and soft matter, both in central Paris, and in the Orsay-Saclay-Palaiseau triangle. Moreover a large number of leading scientific universities and Grandes Ecoles are concentrated in the Paris area, providing a large reservoir of good potential PhD students. If LLB were to cease its activities, this would have far-reaching consequences on the training of future generations of "neutron scatterers", and would have, in the long run, a negative incidence on the highly competitive liquid matter research and its link to life sciences in France.

To conclude, closing down LLB would be extremely damaging for a field which flourishes in France, and where Europe clearly has the lead over the USA.

Cette analyse est confirmée par Dieter Richter:

One of the great challenges of the coming decades will be to deal with and understand complexity. Soft matter together with biological materials are in the center of this new drive in science. There is an abundance of different soft matter systems where the mesoscopic entities range from polymers of various shapes in different kinds of solvents and melts, colloidal particles of various geometries and interactions to self assembled structures like lamellar membranes and droplet microemulsions. Composites of soft matter systems, where different kinds of classical soft matter entities are merged play an increasingly important role. In addition the behaviour of soft matter in external fields is hardly explored. With the abundance of soft matter systems including biological materials and all their composite combinations, there is an abundance of phenomena to be discovered, understood and possibly applied.

LLB with its efforts to bring together biophysics and soft matter has positioned itself very well in this emerging field. There are strong activities in the field of polymer science, there is by now a sizesable effort in biophysics supported by theoretical efforts in particular with computer modelling.... In combining in-house activities with the work of strong outside research groups, LLB is on the right path in this new and exciting field of soft matter and biomaterials. Neutrons will play an essential role also in the future. The large overbooking at the ILL opens an opportunity for LLB to do both, develop the in-house expertise and in parallel to use this expertise in order to advise outside users for the benefit of both.

Dieter développe ensuite l'application aux sciences de la vie et évalue l'activité du LLB en la matière avec son regard de physicien:

The activities in the field of life sciences is to a much larger extent driven by in-house activities within the LLB, which have associated themselves with a number of outside groups who collaborate. Research activities are seen in three areas (a) confined water (b) conformation of proteins in solution, tackling the problem of protein folding (c) the structure dynamic function relationship in biological materials. In all these fields the LLB has performed pioneering experiments and certainly is one of the leading laboratories using neutrons for the investigation of biomaterials. Of particular importance is the close collaboration with computer simulation which is essential in order to interpret experimental results.

In particular interesting are the recent experiments on protein folding, where small angle scattering experiments have been performed on proteins in various states of denaturation. Different morphologies have been identified and irreversibility aspects on the conformation of fibronectin were studied in great detail.

The dynamics of biomolecules, both the diffusion in crowded environments as well as the internal dynamics, have been a focus of recent research. There exists some careful studies on the selfdiffusion of myoglobin at high concentrations addressing both individual and collective motions. The results relate to the oxygen transport on the blood cell level and measurements of hemoglobin diffusion directly inside the erythrocytes were performed. The other fields of interest are internal dynamics of proteins, where function and dynamical properties are related. A recent good example are studies of the effect of threhalose on protein dynamics. The experiments appear to corroborate the theoretical prediction that the glass transition of the matrix into which the protein is embedded plays a major role for the onset of function of the respective protein.

In the future the work on protein folding as well as the structure dynamics functional relationship will be further scrutinized. In the case of folding as a new control parameter the external pressure will be applied, in order to continuously denaturate a protein, or to perform pressure jump experiments, in order to follow the kinetics. For these experiments X-rays as well as neutrons will be employed. For the structure dynamic function relationship partially labelled proteins would be of great help. Here together with outside laboratories new efforts will be undertaken.

Being a physicist, to me the work on biomaterials appears to be well founded and professionally performed. Whether and to what extent these studies touch on the core of the life sciences is quite difficult to judge... However, I am convinced that in the end also physical principles, in particular those which are being developed in the field of soft matter science should play an important role in the understanding of biological function. Thus an intense collaboration between the soft matter and the biophysics could work out further synergies between the two fields.

Lorsque j'ai visité le LLB j'ai été impressionné par la vitalité de ce secteur et par l'enthousiasme de ses acteurs. Certes j'ai moi aussi le regard d'un physicien : la biophysique est un art difficile et le danger est d'être un physicien pour les biologistes, un biologiste pour les physiciens. Les témoignages apportés à la Direction des Sciences de la Vie du CNRS par plusieurs biologistes patentés semblent indiquer que le LLB évite cet écueil et ouvre à la biologie un vrai champ d'applications. Il appartiendra aux Sciences de la Vie d'imprimer leur marque sur les développements à venir.

La conclusion de tous ces textes s'impose: le LLB est un acteur majeur de la physique des neutrons, en France et au plan international, unanimement respecté par nos collègues étrangers. C'est dans ce contexte qu'il faut considérer son avenir.

5) LE LLB VU DEPUIS LES ETATS-UNIS

Il est intéressant de jauger le LLB à l'aune des laboratoires de recherche américains, eux aussi acteurs majeurs de la neutronique. J'ai demandé à Henry Glyde de nous apporter cet éclairage, sous trois angles : (i) une comparaison des modes de fonctionnement de part et d'autre de l'Atlantique, (ii) la réputation scientifique du LLB aux Etats Unis, (iii) une comparaison des moyens engagés pour les grands instruments, tant en investissement qu'en coût de fonctionnement. Voici son témoignage :

LLB is clearly recognized in the USA as a world center of excellence in confined liquids, soft matter, biomaterials and related life (fields close to my interests). Individual scientists and groups are well known internationally and their very significant scientific contributions were readily cited by those consulted. Scientific progress at LLB is part of a long term, based on the insight of the individual scientists (and groups) and the experimental capabilities. LLB is seen as a "stand alone", independent neutron scattering facility that does not rely on any other neutron scattering facility to conduct "final" experiments Scientists at LLB and ILL do collaborate but these collaborations go back and forth. The choice of facility depends on the availability of beam time, conditions needed for the sample, the individuals involved and many other factors in addition to neutron beam intensity.

LLB and Science in France

The scientific programs of LLB, to their great credit, are deeply imbedded in and highly integrated with universities and other (e.g. CNRS) laboratories in France. LLB is an integral part of the scientific community of the nation, an integration which demonstrates the importance of neutron scattering techniques. Together with ILL, LLB has succeeded in educating much of the scientific community in the value of neutrons as an investigative tool. Reciprocally, LLB scientists gain greatly from these scientific collaborations and can draw on sample preparation capabilities and complementary techniques such as NMR, Raman scattering, X-ray measurements that exist in universities. Evaluation of LLB programs cannot ignore these excellent collaborations.

Approximately 85% of experiments at LLB are made in collaboration with outside scientists. Two thirds of these collaborations are with laboratories within France, one third within Europe and the USA. The scientists from the USA who go to LLB are the very best in their fields. Scientists tend to come to such facilities in two modes. Some are "users" of neutrons, individuals or groups who are scientifically independent and largely direct their own experiments, with the assistance of a local

“instrument responsible” who guides them through the instrument. Others are collaborators who have joint research programs with scientists at the facility : the experiments and research are largely done together. Given that LLB is a national facility with a less intense beam, a larger fraction of experiments can be done in the latter mode. Given that ILL is a high flux, high throughput, international facility with several masters, a larger fraction is in the former mode. The two facilities play different roles.

Formation of the future

LLB has an excellent record of training graduate students for a research career in neutron scattering. Forty Ph.D. students have completed their thesis research at LLB in the last three years. Most of these students go on to a career in neutron scattering or associated fields. Some of these students are clearly outstanding : colleagues consulted in the USA knew them by name and cited their research work. The research collaborative mode is an excellent venue for students. The students can be given a topic in the program as well as time to carry it through (ILL has also trained outstanding students from all over Europe, usually in a user’s group: the fast paced, international institute flavour suits some students better than others). In addition to students, LLB has introduced practicing scientists in many fields to neutron scattering as a tool of research. Altogether it opens a large community to neutron physics.

The openness of LLB and its integration into the French scientific community, especially in the fields of chemistry and biology, is seen as a major asset. With that integration neutron scattering becomes an outstanding and unique tool. Integration of this nature has not yet been achieved in the USA. Historically in the USA, neutron scattering was conducted largely by “professionals”, chiefly physicists, in national laboratories with few participants from outside. A major goal in the USA is to expand “user” and collaborative programs and to bring neutrons to the whole scientific community, especially in biology. Major programs are in place to achieve that goal with growing success. The aim is essentially to create just the scientific structure for neutrons in the USA that LLB has already so effectively established in France.

Examples of excellence

Water plays a key role in protein function. An example of world-class science at LLB in the fields discussed with colleagues is the research on water and water solutions confined in porous media and proteins. Water in porous media such as Vycor serves as a model system for water in proteins and on protein surfaces. The structure and the dynamics of these complex systems are interdependent. Protein function appears to depend predominantly on the long time dynamics. Yet, the long time scale dynamics hinges on shorter time scale processes. LLB scientists and collaborators, drawing on the unique capabilities of neutrons to reveal both structure and dynamics, have made major contributions to this field. Particularly, LLB has unique capabilities to explore the motion of water in proteins under pressure.

The program in soft matter and biomaterials is equally outstanding. This program consists of promoting self-assembly of particles, soaps, lipids and polymers into a rich range of desired structures. The structures are determined using Small Angle Neutron Scattering (SANS). Macromolecules consisting of long-chain molecules are being investigated, as are grafted copolymers for biochips. Polymers attached to surfaces, referred to as brushes, including under shear are investigated using neutron reflectometry. The EROS neutron reflectometer at LLB is an outstanding, world-class instrument. These topics are explored in collaboration with several outside laboratories which drive the wide range of topics. The collaborations bring expertise, such as the polymer chemistry at Bordeaux. On a world scale, the LLB program has leaned more

toward biomaterials related to life sciences. This contrasts work in the USA which has leaned more toward polymers of interest to chemical industries driven by chemical engineering. This is shifting in the USA and LLB work is right at the center of interest with a clear lead in dynamics.

USA colleagues identified other distinguished programs and unique instruments, such as a double focusing triple axis spectrometer and a resonant spin echo spectrometer. Unique capabilities in high pressure at LLB were also noted.

Operating funds

Seen from an American perspective, the proposal to reduce the operating funds of LLB or eliminate them entirely appears surprising. It is quite counter to the current policy in the USA, which is to increase the support for neutron scattering research very substantially. There has been a critical shortage of neutrons in the USA for the past ten years. This arose from the unexpected closing of the HFBR reactor neutron facility at Brookhaven National Laboratory, the slow development of the spallation neutron source, LANCE, at Los Alamos National Laboratory and the delay in deciding what type of new source to build. This latter emerged as the Spallation Neutron Source (SNS), which will come on line in 2006 at Oak Ridge National laboratory. While established fields such as magnetism have survived this period reasonably well, newer fields such as soft matter, biomaterials and the life sciences are critically underdeveloped in the USA, especially in the case of dynamics of biomaterials.

As a deliberate policy the USA is devoting substantial new capital funds to neutrons, \$ 1.4 B to build the SNS, a major upgrade of the HFIR reactor source at ORNL (completed) and a major instrument program at LANCE. After 2006 the USA will be spending approximately \$ 250 M annually to operate neutron facilities (Annexe 2). This does not include the substantial instrument-building program at SNS that will continue after 2006. This number is, of course, only an estimate, but one made in consultation with DOE and NIST. The current annual operating funds devoted to synchrotron facilities in the USA is similarly estimated as \$235 M. This does not include contributions from groups who build and operate beam lines and instruments independently at the synchrotron facilities : absolute figures are not significant (if anything they are underestimated). But ratios are !

Three policy points for neutron facilities emerge:

- 1) The USA is making a substantial investment in neutron scattering facilities. The techniques of neutron scattering and synchrotron radiation are seen as complementary. One is not a replacement for the other.
- 2) The USA will soon be spending a comparable amount to operate its neutron and synchrotron facilities.
- 3) Given the \$ 250 M of annual operating funds for neutrons in the USA after 2006, the current annual expenditure of \$ 45 M to operate LLB and the French portion of ILL in France seems modest and totally reasonable. This is especially the case given the high productivity of these two existing and impressive facilities.

The USA has suffered the consequences of reduction of neutron facilities and is paying a major price to restore them. ILL is clearly the best and largest neutron scattering facility in the world and France has been wise to play a leading role in initiating and operating it. LLB is similarly an outstanding national facility- based on the distinction of its current science, the deep integration of its research within the scientific community of France and the leading role it is playing in training future scientists and bringing neutron scattering to the nation. Given its relatively modest operating costs, LLB should be operated at its full 180 days per year with its instrument development program of \$ 1M per year supported. It is a major national resource in full scientific sail.

6) POURQUOI AVONS NOUS BESOIN D'UNE SOURCE DE NEUTRONS NATIONALE ?

La réponse est d'abord quantitative: la part française de l'ILL ne peut pas satisfaire les besoins de neutrons des laboratoires français, de loin! Les chiffres sont éloquentes: en 2002 le nombre de jours instruments utilisés par des laboratoires français se décompose comme suit:

- ILL	1.201
- CRG français à l'ILL	432
- LLB	2.321
- Réacteurs étrangers (surtout ISIS)	183

Il faut pondérer ces chiffres de temps par le flux disponible sur chaque site. Mais il est clair qu'arrêter le LLB signifie étrangler l'expérimentation neutronique en France.

Le LLB est aussi nécessaire pour des raisons qualitatives. Certes l'ILL offre des possibilités uniques (qui ne sont pas toujours nécessaires si l'on dispose de plus de temps). Mais pour en bénéficier il faut savoir parfaitement à l'avance ce que l'on veut y faire. Les temps sont mesurés, le planning échevelé, et il n'est pas question de patauger pour apprendre le métier, encore moins d'explorer des voies hasardeuses. Ce sont pourtant ces excursions dans l'inconnu qui apportent l'innovation. Le LLB, lui, vit sur un rythme plus calme. Il offre aux débutants une disponibilité immédiate, qu'il s'agisse de chercheurs issus d'autres disciplines, ou mieux encore de thésards qui partent de rien. C'est principalement là que se forment les utilisateurs et les spécialistes de demain. Une fois formés ils seront mûrs pour aller à l'ILL et tirer profit de ses performances extrêmes. Il faut pouvoir dialoguer avec les hommes de l'art pour savoir ce qui est faisable. Le LLB joue parfaitement ce rôle, c'est plus difficile à l'ILL. Il est instructif de discuter avec les utilisateurs chimistes ou biologistes: les "pros" exploitent les capacités de l'ILL si nécessaire et se tournent vers le LLB quand ils ont besoin de temps - c'est le bon sens. Ceux qui sont moins formés à la neutronique préfèrent le LLB. Au sein même du LLB les chercheurs n'hésitent pas à se tourner vers l'ILL quand en ont besoin. En gros, un chercheur sur deux va à l'ILL pour environ une semaine par an. Le recouvrement existe donc, mais il est marginal : les deux institutions sont essentielles.

Une communauté ne s'épanouit que si elle a un terreau national. Tous les pays le savent: il est très difficile d'intéresser les chercheurs aux neutrons ou au rayonnement synchrotron si cette démarche ne s'appuie pas sur un équipement proche. Ces techniques sont exigeantes et impliquent un saut qualitatif: il faut s'y roder sur place avant d'utiliser des équipements internationaux. Certains physiciens s'investissent spontanément: c'est le cas de l'Espagne, gros utilisateur bien qu'elle n'ait aucun moyen sur place. C'est un peu l'exception: les neutroniciens italiens, de grande qualité, viennent au LLB et à l'ILL, mais ils sont peu nombreux. De toute manière une telle démarche volontariste est difficile pour les chercheurs de disciplines plus éloignées - sauf en Allemagne et en Grande Bretagne qui disposent d'une source nationale.

Besoin quantitatif de temps de faisceau, besoin qualitatif de formation et d'innovation, deux raisons qui militent pour le maintien et du développement du LLB. J'en ajouterai deux autres:

- la présence à Saclay d'outils expérimentaux uniques en leur genre - je pense en particulier à la neutronique sous haute pression et à la réflectométrie
- la proximité dans quelques années de SOLEIL. Il est de plus en plus clair que neutrons et rayonnement synchrotron sont des outils complémentaires qui se fécondent mutuellement. Ils apportent des éclairages différents sur les mêmes problèmes: l'expérience de l'ILL et de l'ESRF montre l'importance d'un dialogue permanent entre les deux communautés. Si les théoriciens peuvent vivre en symbiose, les expérimentateurs, eux, ne sont pas interchangeables. Ils doivent être voisins pour faire éclore des projets communs. A terme le LLB et SOLEIL rempliront ce rôle. Cela prendra du temps - mais supprimer une pièce de l'attelage rendrait l'autre bancal.

CONCLUSION

La mission de ce groupe de réflexion est d'ordre scientifique. Il ne nous appartient pas de disserter sur le financement du LLB, sur l'implication relative du CNRS et du CEA, sur l'équilibrage des relations internationales avec les chercheurs étrangers - encore moins de comparer la charge pour le budget français de l'ILL et du LLB qui ont des règles comptables différentes (c'est un travail de professionnel !). Mais un point capital doit être souligné. La décision de construire un instrument nouveau est une décision politique. Une fois l'instrument

construit, les organismes qui le gèrent sont comptables vis à vis du pays de son utilisation. Il leur appartient de rentabiliser les investissements lourds qui lui ont été consacrés. Passer un tel investissement par profits et pertes pour des raisons comptables serait un gachis inacceptable pour le pays dans son ensemble. Le LLB appartient à cette catégorie. Il est à la pointe de la technique, reconnu comme l'un des réacteurs les plus performants au monde dans sa catégorie. Les programmes de jouvence successifs (le dernier est en route) le maintiennent à ce niveau. L'investissement cumulé a produit un outil remarquable, utile à toute la communauté scientifique, des physiciens aux biologistes. Nous sommes tous comptables de cet investissement. Maintenant qu'il apporte ses fruits, le disperser serait un gachis intolérable.

Un accord provisoire a été conclu pour 2004 entre les deux partenaires que sont le CNRS et le CEA : il prévoit une forte réduction du nombre de jours de fonctionnement, qui passe de 180 en 2002 à 110 en 2004. Cette chute draconienne de 39% peut résoudre des problèmes de trésorerie immédiate, mais à terme c'est une très mauvaise solution. La demande de neutrons des scientifiques français ne pourra plus être honorée, et ce pour des économies marginales (la réduction réelle des dépenses est bien inférieure, car beaucoup de chapitres sont incompressibles). Une telle demi-mesure est elle aussi incompatible avec la rentabilisation des investissements passés

Pour conclure, un point essentiel doit être souligné. Nous avons plaidé la cause du LLB, qui reste un acteur majeur de la neutronique en France et en Europe. Mais ce faisant nous ne mettons pas en cause le rôle de l'ILL. Il faut cesser d'opposer les deux instituts : ce n'est pas l'un ou l'autre, mais l'un et l'autre. Ils sont à bien des égards complémentaires, l'ILL irremplaçable lorsqu'on s'approche des limites de sensibilité, le LLB moins performant mais plus flexible. Ils ont besoin l'un de l'autre: vu du LLB, l'ILL permet de pousser la technique à ses limites extrêmes, vu de l'ILL, le LLB permet d'explorer des voies inattendues et de former les générations futures de neutroniciens. Ensemble ils assurent à la France une position solide à l'échelle internationale.

Ph. Nozières
19/11/2003

Annexe 1

Le tableau ci contre recense les échanges de services entre neutroniciens français et étrangers. Il convient de mettre à part les CRG, financés conjointement par les deux parties. Dans certains cas le bilan est bien équilibré (pour l'Angleterre par exemple). Il est plus souvent déficitaire. Ce serait une grosse erreur de vouloir le rétablir sur des critères purement financiers. Un tel bilan ne peut être que global. Les neutrons français peuvent être compensés par les photons italiens, etc... De toute manière, la coopération entre pays européens est inscrite dans l'histoire : il faut la préserver et l'encourager ! Elle ne se limite pas d'ailleurs à des temps de faisceau. Je cite comme exemple la collaboration avec la Russie, qui a apporté au LLB sa technologie des hautes pressions, fleuron de son développement instrumental.

Il convient donc d'être prudent. On pourrait par exemple chercher auprès de la Communauté Européenne une aide matérielle pour ceux des utilisateurs qui ne sont pas en mesure d'assurer un minimum de réciprocité. Nous soulevons la question qui n'est pas de notre ressort pour formuler une mise en garde.

Bilan des réalisations par pays pour l'année 2002

Pays	CRG	Nbre d'expériences réalisées	Temps de réalisation (en jours de faisceau)	% du temps de réalisation par pays	Temps français réalisé à l'étranger (% du temps disponible)
ALLEMAGNE	CRG (2)	39	206 120	5,70%	60
AUTRICHE	CRG (1)	8	37 60	1,02%	
BELGIQUE		3	14	0,39%	
ESPAGNE		13	80	2,21%	
GRECE		6	40	1,11%	
IRLANDE		2	10	0,28%	
ITALIE	CRG (1)	16	28 60	0,77%	
PAYS-BAS		6	28	0,77%	
PORTUGAL		2	13	0,36%	
ROYAUME-UNI		8	81,5	2,26%	77 (3%)
SUEDE		7	22	0,61%	
HONGRIE		3	32	0,89%	
POLOGNE		5	66	1,83%	
REPUBLIQUE TCHEQUE		3	20	0,55%	
ARGENTINE		1	11	0,30%	
ETATS-UNIS		8	55	1,52%	
JAPON		7	48	1,33%	
MAROC		5	18	0,50%	
ROUMANIE		2	19	0,53%	
SLOVAQUIE		2	16	0,44%	36 (3,5%)
SUISSE		3	55	1,52%	
TUNISIE		2	5	0,14%	
TOTAL	5	477	3613,5	-	173

Annexe 2 : projected operating annual cost of neutron facilities in the US in 2006

« NCNR »	National Institute of Standards Reactor, 4.10^{14} n/sec/cm ² , 20 instruments	\$20M
« HIFR »	Oakridge Reactor, 1.10^{15} n/sec/cm ² , 8 instruments	\$40M
« LANCE »	Los Alamos Spallation, 56 kW	\$40M
« IPNS »	Argonne Spallation, 7 kW	\$17M
« SNS »	Oakridge Spallation, 1.400 kW	\$150M
Reference :	ILL = $1,5.10^{15}$ n/sec/cm ² , 35 instruments LLB = 3.10^{14} n/sec/cm ² , 25 instruments ISIS = 160 kW	