

N° 2258

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

ONZIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la Présidence de
l'Assemblée nationale
le 17 mars 2000.

N° 273

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE DE 1999-2000

Annexe au procès-verbal de la séance
du 21 mars 2000.

**OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES**

RAPPORT

SUR

**Les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron
et le rôle des très grands Équipements dans la recherche publique
ou privée, en France et en Europe**

Par

M. Christian CUVILLIEZ, Député et M. René TRÉGOUËT, Sénateur

**Tome I : Les conditions d'implantation
d'un nouveau synchrotron**

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale	Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. Jean-Yves LE DÉAUT,	par M. Henri REVOL,
<i>Premier Vice-Président de l'Office.</i>	<i>Président de l'Office</i>

RÉSUMÉ

Conduite avec l'aide de dix scientifiques de haut niveau représentant tous les horizons de la recherche française et européenne, publique ou privée, l'étude de M. Christian CUVILLIEZ, Député de Seine-Maritime et M. René TRÉGOUËT, Sénateur du Rhône, sur les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron, réalisée dans le cadre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, met en évidence que les synchrotrons, en tant que grands instruments partagés par des milliers d'utilisateurs, accessibles grâce à l'assistance rapprochée des concepteurs, formateurs pour des centaines de jeunes chercheurs et pluridisciplinaires par nature ne sont pas des très grands équipements comme les autres.

En raison du surcoût par utilisateur des accès à des machines étrangères, la prise de participations dans des machines anglo-française, allemande ou suisse ne peut constituer qu'un investissement supplémentaire au profit d'une discipline comme la biologie et non pas une solution de remplacement à un synchrotron national.

Pour garder les compétences françaises de haut niveau mondial dans la technologie des synchrotrons et pour offrir aux milliers d'utilisateurs français un accès libre, proche et d'un coût modéré aux méthodes d'analyse de pointe que permet le rayonnement synchrotron, la construction d'une machine de 2,75 GeV doit être lancée sans délai supplémentaire dans une région bien desservie et à vocation scientifique affirmée.

Le présent rapport a pour premier objectif d'informer le Parlement sur un enjeu scientifique global, à savoir l'accès aux moyens techniques de pointe fournis par les synchrotrons, et de rétablir les conditions d'un dialogue interrompu par la crise de confiance survenue entre les responsables de la recherche et la communauté des concepteurs et des utilisateurs de synchrotron, suite à l'abandon du projet SOLEIL et à la décision de prendre une participation dans le projet DIAMOND du gouvernement britannique et du Wellcome Trust.

Alors qu'un débat pour le moins vif a entraîné chacun à faire état de positions extrêmes, ce rapport, qui avait également pour but de faire le clair sur les oppositions en apparence irréconciliables entre synchrotrons et moyens de fonctionnement des laboratoires et entre

solution nationale et coopération européenne, conclut sur les convergences qui existent en réalité sur tous ces points.

• *Le rayonnement synchrotron, un saut technologique majeur pour l'analyse de la matière*

Les synchrotrons produisent des ondes électromagnétiques de toutes longueurs d'onde, utilisées par un nombre considérable de méthodes d'analyse de la matière. Ces machines sont constituées d'une part d'un anneau de stockage dans lequel les électrons tournent 350 000 fois par seconde à une vitesse proche de celle de la lumière et d'autre part de lignes de lumière et de postes expérimentaux périphériques qui utilisent la lumière émise par les électrons lors de passage dans des aimants de courbure ou des " *chicanes* " (" wigglers " et onduleurs) placées sur leur trajectoire, lumière dénommée rayonnement synchrotron.

Les synchrotrons, qui sont utilisés chacun par plusieurs milliers de chercheurs, constituent une avancée technologique majeure puisque le rayonnement synchrotron des synchrotrons de 3^{ème} génération est mille milliards de fois plus brillant que les rayons émis par des équipements de laboratoire comme les tubes à rayons X.

• *Un très grand instrument indissociable de ses laboratoires de conception et d'exploitation*

Compte tenu de la technicité de ses installations et de son potentiel d'applications nouvelles, un synchrotron associe étroitement ses concepteurs et ses exploitants à des utilisateurs permanents dont les laboratoires sont situés à proximité de la machine, dans une collaboration étroite et pluridisciplinaire par nature.

Alors que l'on se trouve déjà à la 3^{ème} génération de machines, l'évolution technique des synchrotrons est loin d'être achevée, des progrès considérables étant attendus sur les onduleurs, l'optique des lignes de lumière, et l'instrumentation, et notamment les détecteurs. En outre, de nouvelles perspectives existent en termes de machines dérivées des actuels synchrotrons mais complémentaires, les lasers à électrons libres.

• *Un grand instrument banalisé, partagé, accessible, formateur et pluridisciplinaire, et donc " pas comme les autres "*

Un synchrotron, même de 3^{ème} génération, apparaît aujourd'hui comme une machine banalisée, au service d'une vaste communauté de chercheurs appartenant à des laboratoires multiples, répartis sur tout le

territoire et venant même de l'étranger pour près du quart du total en moyenne.

Les chercheurs visiteurs de toutes disciplines, qui se relaient sur les postes expérimentaux des synchrotrons, bénéficient d'une assistance rapprochée de la part des concepteurs et des chercheurs résidents. Par ailleurs, les synchrotrons jouent un rôle important dans la formation des jeunes chercheurs.

" *Super laboratoire* " pluridisciplinaire de service aux autres laboratoires, un synchrotron n'est donc pas un très grand instrument comme les autres qui sont le plus souvent au service d'une seule discipline.

• *L'investissement dans un synchrotron national, un enjeu scientifique global reconnu comme tel par des pays de toutes dimensions*

Un synchrotron irriguant toutes les disciplines d'une communauté scientifique, la libre disposition d'au moins un instrument national est considérée par des pays de toute taille comme un impératif dans leurs investissements de recherche.

Sur le seul continent européen, l'Italie dispose d'une source de 3^{ème} génération déjà saturée ; la Suisse termine la construction de son propre synchrotron jugé indispensable à sa recherche publique et à son industrie pharmaceutique ; la Suède possède trois synchrotrons diversifiés et l'Allemagne dispose de 5 centres de rayonnement synchrotron avec un total de 7 anneaux de stockage. Sur d'autres continents, le Canada va construire sa propre source, alors que les Etats-Unis voisins disposent de 11 centres de rayonnement synchrotron. En Asie, le Japon exploite plusieurs synchrotrons dont certains possédés directement par des grandes entreprises. La Thaïlande, Taiwan et bientôt l'Australie ont également investi dans ce domaine.

Ces instruments étant jugés par des pays de toute taille comme à leur portée, il n'existe donc logiquement dans le monde qu'un seul synchrotron international (l'ESRF de Grenoble), dont la construction a, au demeurant, correspondu à des contraintes techniques et financières aujourd'hui dépassées.

• *La prise de participation dans des machines étrangères, un investissement supplémentaire et non pas une solution de remplacement d'un synchrotron national, du fait de son coût élevé par utilisateur*

Même si les résultats de la négociation avec le gouvernement britannique ne sont pas encore connus, il est très probable que la participation française conduira à des coûts par ligne de lumière supérieurs d'au moins 50 % au coût des lignes de lumière d'un synchrotron national.

Le projet de participation française dans le synchrotron DIAMOND doit donc être analysé essentiellement comme un investissement dans un rapprochement avec une communauté scientifique d'outre-Manche en pointe dans les biotechnologies.

La prise de participation dans un synchrotron étranger et la location de lignes sur d'autres machines ne semblent pas pouvoir apporter, à des coûts supportables, les accès nombreux, libres et proches dont les chercheurs français ont besoin.

Au surplus, l'exemple de l'Italie dans le domaine de la physique neutronique, montre que la disparition d'une machine entraîne l'effondrement d'une discipline.

• *La coopération européenne, selon le principe de subsidiarité, pour des projets de développement aléatoires et pour la réduction des coûts*

Chaque pays européen ayant besoin de son propre équipement pour faire face aux demandes des chercheurs, l'application privilégiée des coopérations bilatérales pourrait être la mise au point de programmes de construction de synchrotrons concertés et étalés dans le temps afin de dégager des économies d'échelle.

Les collaborations dans un cadre communautaire devraient trouver, en vertu du principe de subsidiarité, des applications privilégiées d'une part dans le soutien aux initiatives nationales et d'autre part dans des projets par définition soumis à des aléas que sont les futurs développements des lasers à électrons libres.

• *un synchrotron national polyvalent, pluridisciplinaire et évolutif, indispensable pour la communauté scientifique française*

La construction immédiate en France d'une source nationale de rayonnement synchrotron est un impératif pour la dynamique scientifique, éducative et industrielle de notre pays.

Il convient en effet de mettre une machine polyvalente, facile d'accès et évolutive à la disposition d'une vaste communauté française de

concepteurs et d'utilisateurs de synchrotrons, physiciens, chimistes, biologistes, dont les compétences sont reconnues dans le monde entier.

En l'occurrence, il est absolument vital que la France garde un statut de partenaire sur le réseau mondial des synchrotrons et ne glisse pas vers celui de simple client des principaux synchrotrons étrangers.

Certes le statut de "*chercheur international*" passant sur une machine internationale pour compléter les expériences réalisées sur le sol national est celui que l'on rencontre aujourd'hui, en particulier dans le domaine des synchrotrons. Mais il ne saurait être confondu avec celui de "*chercheur errant*" d'une machine étrangère à une autre, au gré de créneaux de disponibilité toujours rares et âprement disputés.

• ***des conditions de fonctionnement à optimiser***

Des initiatives semblent indispensables pour rénover les conditions d'investissement dans de grands instruments de service comme les synchrotrons. La mise en réserve de dotations analogues aux dotations pour amortissement devrait être autorisée aux grands organismes de recherche pour faciliter un renouvellement sans à-coup de ces installations.

Pour associer les grandes entreprises à la construction et à l'exploitation d'un nouveau synchrotron, il semble par ailleurs indispensable, compte tenu du niveau des prélèvements sur les sociétés, de mettre en place en France comme dans la majorité des autres pays développés, une fiscalité favorable à l'investissement dans les lignes de lumière du futur synchrotron national.

Il convient aussi de rechercher les conditions de statut du futur établissement qui permettront d'optimiser le potentiel de la source nationale de 3^{ème} génération.

*

En tout état de cause, il est temps que s'arrête une de ces guerres d'opinion franco-françaises que les partenaires de la France contemplent avec stupéfaction ou douleur et que soient détaillées et appliquées les orientations proposées par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, qui n'ont d'autre finalité que de vouloir combiner les atouts de la recherche française et européenne, sur des bases nationales fortes, pour le plus grand succès de nos chercheurs.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le rapport qui vous est présenté sur les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron, fait suite à la saisine de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques par le Bureau de l'Assemblée nationale, le 17 novembre 1999, en réponse à une demande du groupe communiste portant sur "*les conditions techniques d'implantation du projet de synchrotron SOLEIL*",

Après la décision des pouvoirs publics, annoncée le 2 août 1999, d'abandonner le projet SOLEIL au profit d'une solution de coopération avec le Royaume Uni souvent présentée comme la solution DIAMOND, un fossé d'incompréhension s'est en effet creusé entre la communauté des utilisateurs de synchrotrons et le ministère de la recherche, au point de donner naissance à une véritable crise de confiance.

Aussi, dès le début de l'étude, le souci essentiel de l'Office et de ses Rapporteurs a-t-il été de rétablir les conditions d'un dialogue interrompu et d'analyser les éventuels enjeux nationaux d'une décision portant fût-ce sur un seul grand instrument comme le futur synchrotron.

Au demeurant, conformément à la mission de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, ce rapport a aussi comme objectif fondamental d'informer le Parlement sur une question qui, en apparence technique, touche, en réalité, aux intérêts fondamentaux et à l'avenir de la recherche scientifique dans notre pays.

Un bref exposé de la méthode suivie semble nécessaire pour donner leur vrai relief aux analyses qui sont présentées dans ce rapport.

Nommés le 24 novembre, avec l'invitation expresse des membres de l'Office à réfléchir à un élargissement du sujet, vos Rapporteurs ont présenté leur étude de faisabilité, une étape indispensable dans le processus de l'Office, le 15 décembre 1999, non sans avoir au préalable auditionné le directeur du Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique (LURE) d'Orsay, centre de recherche pionnier et toujours leader de cette technologie dans notre pays

Cette étude de faisabilité proposait d'entrée une démarche objective, énonçait toutes les questions auxquelles il apparaissait nécessaire de répondre et proposait plusieurs possibilités d'élargissement du champ de l'étude, dont celle qui fut finalement retenue et acceptée le 2 février 2000 par le Bureau de l'Assemblée nationale, à savoir "*les conditions*

d'implantation d'un nouveau synchrotron et le rôle des très grands équipements dans la recherche publique et privée, en France et en Europe. "

Compte tenu du délai de 3 mois imparti, seul le premier point relatif au nouveau synchrotron fait l'objet du présent rapport.

Pour les aider conduire leur étude, vos Rapporteurs se sont entourés d'un groupe de travail constitué de 10 éminents scientifiques représentant les différentes composantes de la science dans notre pays – université, grands organismes, recherche industrielle - et témoignant d'opinions de départ contrastées sur les synchrotrons.

En voici la liste :

M. Hervé ARRIBART Conseiller du Directeur de la Recherche du Groupe SAINT GOBAIN

M. Jean-Pierre CHANGEUX Professeur au Collège de France, Membre de l'Académie des Sciences

M. Georges CHARPAK Membre de l'Académie des Sciences, Prix Nobel

M. Gilles COHEN-TANNOUJDI Ancien élève de l'Ecole Polytechnique, Dr d'Etat ès Sc. Phys., conseiller du Directeur des Sciences de la Matière au CEA

M. Jean GALLOT Dr d'Etat ès Sc. Phys., Professeur émérite à l'Université de Rouen, ancien Recteur

M. Jean JERPHAGNON Conseiller du Directeur technique d'ALCATEL

M. Vincent MIKOL Directeur de recherche, Aventis

M. Guy OurISSON Président de l'Académie des Sciences

M. Pierre POINTU Ingénieur de l'Ecole Centrale, Dr ès Sciences, ancien Directeur des services de recherche au groupe Saint Gobain

M. Jochen SCHNEIDER Directeur du laboratoire allemand du rayonnement synchrotron Hasylab (DESY-Hambourg)

Aidés de ce groupe de travail prestigieux dont ils remercient chacun des membres, vos Rapporteurs ont eu le souci de rassembler les points de vue, sans aucune exclusive, toutes les parties prenantes au dossier ayant été effectivement auditionnées.

En outre vos Rapporteurs ont, comme il est normal, visité les synchrotrons présents sur le sol français, le LURE d'Orsay et l'ESRF de Grenoble, ainsi que d'autres centres de recherche en Europe intéressés par ces grands instruments, celui de Daresbury où se trouve le synchrotron SRS, le Rutherford Appleton Laboratory à Didcot près d'Oxford, qui pourrait accueillir le projet DIAMOND, et, enfin, le Deutsche Elektronen-Synchrotron de Hambourg qui gère les synchrotrons PETRA II et DORIS III.

Toutes les étapes des travaux de vos Rapporteurs ont fait l'objet d'une information la plus large possible, les comptes rendus des auditions et des visites étant établis au fur et à mesure et diffusés sans délai au sein du groupe de travail, de façon que les principales parties prenantes puissent être informées de la progression des investigations du groupe de travail. Ces documents se trouvent bien entendu annexés au présent rapport.

Autre point important, une audition publique a été organisée le 2 mars 2000 sur le thème de "*l'importance des synchrotrons pour la recherche et les projets dans ce domaine en France et en Europe*", dont le compte rendu sténographique figure également en annexe.

Ainsi que l'ont attesté de nombreux interlocuteurs de vos Rapporteurs, la méthode suivie s'est efforcée, avec quelque succès, non seulement de se rapprocher de l'objectivité – une tâche toujours difficile dans une situation de crise –, mais également d'être respectueuse de tous les points de vue.

Au reste, dans la droite ligne de la vocation de l'Office, l'objectif essentiel de vos Rapporteurs est naturellement de contribuer à faire apparaître la meilleure solution pour la recherche française.

A ce titre, puisque les ressources budgétaires de la recherche sont limitées et que d'autres besoins des chercheurs que l'accès à des synchrotrons doivent être financés, une place centrale est réservée à la question du meilleur choix pour les utilisateurs présents et futurs du rayonnement synchrotron.

C'est pourquoi la question du coût par utilisateur est posée en contrepoint de l'analyse des différentes solutions en présence et des recommandations qui sont présentées dans la suite.

Au terme de leurs investigations, vos Rapporteurs ont acquis la conviction que les synchrotrons, en desservant un ensemble d'utilisateurs considérables et appartenant à toutes les disciplines scientifiques, représentent davantage un laboratoire de services qu'un très grand instrument dans son acception traditionnelle. Les pays de toute dimension qui se dotent de synchrotrons nationaux l'ont d'ailleurs bien compris.

Si une coopération internationale apparaît souhaitable dans le domaine des synchrotrons, elle pourrait avantageusement se situer au niveau de recherches de pointe sur de nouvelles machines, les lasers à électrons libres, pour lesquels il est nécessaire, en raison de leurs aléas, de mettre des ressources intellectuelles en commun et de partager les risques.

Mais, en tout état de cause, une source nationale au sein d'un réseau européen est indispensable à la fois pour les besoins d'application de la communauté scientifique et de l'industrie, pour la formation des chercheurs et pour la pérennité de la présence française dans cette technologie clé pour l'avenir.

– CHAPITRE I – UN ENJEU SCIENTIFIQUE GLOBAL ET PRIMORDIAL, RECONNU COMME TEL PAR DES PAYS DE TOUTES DIMENSIONS

Introduction

Les synchrotrons sont des grands instruments d'analyse de la matière.

Produisant des rayonnements électromagnétiques de toutes longueurs d'onde selon des faisceaux d'une brillance exceptionnelle, les synchrotrons ont connu des progrès très rapides en termes de performances, de facilité et de coûts de mise en œuvre.

Ils sont devenus très vite des compléments indispensables aux appareils de laboratoires pour un vaste ensemble de techniques des sciences de la matière et des sciences du vivant.

Du fait de sa complexité mais aussi de ses possibilités d'évolution permanente, l'installation représentée par un synchrotron est indissociable de ses équipes de chercheurs permanents, les uns attachés au fonctionnement de la machine et à son perfectionnement et les autres utilisant au quotidien celle-ci pour conduire des recherches propres en physique, en chimie et en biologie.

Mais le synchrotron est également indissociable des équipes de chercheurs visiteurs qui se relaient sur ses installations pour tirer parti à la fois des possibilités extraordinaires de la machine et de l'expertise accumulée par les chercheurs permanents et concentrée sur le site.

Cette évolution et la structure qui en résulte sont communes à tous les synchrotrons, où qu'ils se trouvent, en Europe, aux Etats-Unis ou en Asie.

Ainsi le synchrotron constitue-t-il davantage un instrument de services apportés à un ensemble d'utilisateurs appartenant à des équipes de recherche nombreuses et diversifiées qu'un très grand équipement comme un collisionneur linéaire ou un satellite attaché à un domaine spécifique.

I – QU'EST-CE QU'UN SYNCHROTRON ET À QUOI SERT-IL ?

Le terme de synchrotron désigne usuellement un système d'accélérateurs utilisés non pas pour l'étude fondamentale des constituants élémentaires de la matière mais pour la production d'un rayonnement électromagnétique particulier appelé rayonnement synchrotron.

1. Accélérateurs et synchrotrons

Les accélérateurs sont les installations de base de la physique des particules.

Ils servent à accélérer à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, des particules élémentaire – électrons, positons, protons, ions – et à les projeter contre des cibles fixes ou elles-mêmes en mouvement à grande vitesse. A la suite des chocs ainsi produits, ces particules donnent naissance à d'autres constituants élémentaires ou composés, ce qui permet l'étude des briques élémentaires de la matière.

On distingue généralement deux types d'accélérateurs, les accélérateurs linéaires ou "*Linacs*" et les accélérateurs circulaires "*cyclotrons*" et "*synchrotrons*".

Le domaine préférentiel d'utilisation des accélérateurs linéaires ou circulaires est ainsi celui de la physique fondamentale. L'un des accélérateurs les plus connus est celui du grand anneau LEP du CERN.

Le terme synchrotron désigne aujourd'hui un ensemble d'accélérateurs d'une catégorie particulière, dont la vocation est la production de rayonnement électromagnétique.

En 1944, deux physiciens soviétiques constatent dans un accélérateur de particules la présence d'un rayonnement électromagnétique dans certaines conditions. La même observation est faite en 1947 aux Etats-Unis par des chercheurs de General Electric.

Ce rayonnement est considéré dans un premier temps comme parasite, puisqu'il traduit une perte d'énergie des particules alors que précisément, c'est un accroissement de leur énergie que l'on recherche classiquement en les accélérant. Ce phénomène est bientôt constaté par tous les utilisateurs d'accélérateurs, qui cherchent à le minimiser et s'en protéger.

Mais rapidement, il apparaît que le rayonnement électromagnétique produit a des qualités exceptionnelles d'un grand intérêt pour l'analyse non destructive des matériaux. Par convention, on appelle rayonnement synchrotron, le rayonnement électromagnétique émis dans un système spécialisé d'accélérateurs.

Le temps des accélérateurs dédiés à la production de rayonnement synchrotron débute dès les années soixante-dix.

Au vrai, les synchrotrons sont des équipements de grande taille en forme d'anneau. On trouvera ci-après le schéma type des synchrotrons modernes comme ESRF ou SOLEIL.

Au centre, se trouve un accélérateur linéaire qui permet de communiquer aux électrons une vitesse initiale très élevée, avant qu'ils soient injectés dans un accélérateur circulaire où leur énergie s'accroît tour après tour lors de leur passage dans les aimants disposés tout autour de l'anneau.

Une fois le niveau d'énergie souhaité atteint, ces particules sont envoyées dans un anneau de stockage, comparable à un " *vélodrome à électrons* ", où elles serviront à la production de rayonnements électromagnétiques (voir figure suivante).

A titre d'illustration de la technicité des synchrotrons, les électrons tournent dans l'anneau de stockage à une vitesse proche de celle de la lumière, ce qui les conduit à faire près de 350 000 tours par seconde.

Figure 1 : Schéma simplifié du synchrotron ESRF

Dans les synchrotrons de première et deuxième génération, le rayonnement est produit tangentiellement à la trajectoire circulaire des électrons située dans le plan horizontal, lors de leur passage dans les aimants de courbure qui incurvent la trajectoire des particules.

Les synchrotrons de troisième génération produisent, quant à eux, le rayonnement synchrotron non seulement dans les aimants de courbure mais également dans des dispositifs d'insertion spéciaux implantés dans les parties rectilignes de l'anneau.

Dans les deux cas, c'est en subissant un changement de trajectoire que les électrons perdent de l'énergie sous forme d'émission d'ondes électromagnétiques.

2. Les infrastructures de base et les équipements optionnels d'un synchrotron

Pour la bonne compréhension des enjeux techniques et financiers des synchrotrons, il est indispensable de distinguer ses équipements de base de ses équipements optionnels que sont les dispositifs d'insertion et les lignes de lumière (voir figure suivante).

Figure 2 : Schéma sommaire des lignes de lumière

Les équipements de base d'un synchrotron sont l'accélérateur linéaire, le synchrotron proprement dit et l'anneau de stockage. C'est sur ce dernier qu'est produit le rayonnement synchrotron.

Dans la pratique, un anneau de stockage comprend des sections courbes et des sections droites.

Les sections courbes comprennent les aimants de courbure qui constituent le dispositif le plus ancien et le moins performant de production du rayonnement synchrotron.

C'est au contraire sur les sections droites que sont installés les "*wigglers*", des dispositifs de performances intermédiaires et les onduleurs, d'une technologie plus récente et encore évolutive, qui produisent les faisceaux les plus intenses et les plus fins. L'équipement des sections droites en dispositifs d'insertion qui permettront de produire le rayonnement synchrotron, peut se faire progressivement.

Les caractéristiques de l'anneau de stockage constituent un paramètre très important de la décision d'investissement.

L'énergie de l'anneau détermine les méthodes qui pourront être mises en œuvre et la facilité de conduite de la machine au regard de la stabilité des faisceaux. La taille de l'anneau conditionne le nombre de sections droites et donc le nombre de lignes de lumière que l'on peut installer.

Mais une distinction capitale doit être faite entre l'anneau de stockage et l'ensemble constitué par les dispositifs optionnels d'insertion et les lignes de lumière.

L'anneau de stockage et ses appareillages situés en amont représentent des équipements de base souvent financés par un organisme public de recherche.

Les équipements optionnels correspondent à différents types d'utilisation et d'utilisateurs et peuvent faire l'objet d'une construction progressive et d'un financement distinct de celui des installations de base proprement dites.

Ainsi, aux Etats-Unis, en Allemagne, en Suisse et en France également, la construction et l'équipement de lignes de lumière ont pu être financés par des entreprises et des groupes d'entreprises spécialement intéressées par un accès permanent au synchrotron mais aussi par des universités, des collectivités locales, voire des pays étrangers.

3. Le rayonnement synchrotron

En tant que source de rayonnements électromagnétiques, un synchrotron permet de produire un rayonnement variant de façon continue sur une large plage de longueurs d'onde. Grâce aux synchrotrons, il est devenu possible de produire des UV et des rayons X lointains.

Par ailleurs, le rayonnement synchrotron peut être produit avec une forte intensité dans une bande passante en énergie ou une longueur d'onde très précise.

La brillance du rayonnement synchrotron est plus élevée d'un facteur 10^{12} que celle d'une lampe à rayons X. Le faisceau par ailleurs peut être extrêmement bien focalisé dans toute la gamme d'énergie des photons.

Autre particularité essentielle, le rayonnement synchrotron est polarisé, sa polarisation circulaire ou linéaire étant ajustable. Ceci permet, par exemple, l'étude des propriétés de surface des matériaux et des interfaces et le développement rapide de la micro spectroscopie magnétique.

En outre, le rayonnement synchrotron est intrinsèquement émis en régime pulsé très rapide. Cette caractéristique permet d'étudier la dynamique de différents phénomènes fugaces, comme des réactions chimiques ou des déformations de molécules.

Cet ensemble de propriétés remarquables ouvre au rayonnement synchrotron des applications en nombre croissant, en physique, en chimie, en sciences de l'environnement, en médecine et en biologie.

4. Une " coopérative " de production d'ondes électromagnétiques de haute qualité pour des méthodes expérimentales diversifiées

C'est en raison de la qualité de leurs faisceaux d'ondes électromagnétiques que les synchrotrons se sont multipliés afin de satisfaire les demandes d'accès des utilisateurs.

Dès la première génération de synchrotrons, les performances obtenues ont dépassé très largement les sources habituelles comme les tubes à rayons X de première génération et les tubes à anode tournante. Ainsi, la brillance du synchrotron DCI du LURE est 10 000 fois supérieure à celle d'un tube à rayons X de laboratoire.

Ce progrès dans les performances a continué avec la deuxième génération puis avec la troisième génération de synchrotrons dont les faisceaux atteignent une brillance mille milliards de fois supérieure à celle des tubes à anode tournante (voir figure suivante).

Figure 3 : L'augmentation des performances des synchrotrons au cours du temps, mesurées par leur brillance

Parallèlement à ces gains sur la brillance des faisceaux, des méthodes expérimentales nouvelles ont été mises au point, de sorte que les synchrotrons proposent toute une panoplie de techniques d'étude pour les sciences de la matière et les sciences du vivant (voir tableau suivant).

Tableau 1 : Principales méthodes mises en œuvre sur les lignes de lumière de l'ESRF de Grenoble

méthode d'analyse	dispositif
absorption de rayons X	Dispositif d'insertion 26
cristallographie des protéines	Dispositif d'insertion 14
diffraction de haute énergie et de surface	Dispositifs d'insertion 15A et 3
diffusion d'anomalie	Dispositif d'insertion 1
diffusion inélastique moyenne ou	Dispositif d'insertion

haute énergie	16 et 15B
diffusion magnétique	Dispositif d'insertion 20
diffusion nucléaire	Dispositif d'insertion 18
haute brillance et lumière blanche	Dispositifs d'insertion 2 et 9
microfluorescence	Dispositif d'insertion 22
microfocalisation	Dispositif d'insertion 13
microscopie rayons X	Dispositif d'insertion 21
polarisation circulaire	Dispositif d'insertion 12A
spectroscopie d'absorption rayons X	Aimant de courbure 29

Au total, les synchrotrons produisent des rayonnements électromagnétiques couvrant une partie très importante du spectre des énergies et des longueurs d'onde.

Figure 4 : Les ondes électromagnétiques

Le synchrotron apparaît bien dès lors comme un équipement de type coopératif à double titre.

En premier lieu, il produit des rayonnements pour toute une série de méthodes expérimentales.

En deuxième lieu, ses installations sont utilisées non seulement par les chercheurs résidents mais aussi par les chercheurs visiteurs qui se succèdent ces installations dans le but d'accéder aux meilleures sources de rayonnement électromagnétique.

II – EN TANT QUE MACHINE DE SERVICE POUR DE NOMBREUX LABORATOIRES RÉPARTIS SUR TOUT LE TERRITOIRE, UN TRÈS GRAND INSTRUMENT D'UNE NATURE PARTICULIÈRE

Les synchrotrons ont connu en quelques dizaines d'années une évolution considérable de leur place dans la recherche scientifique. Cette évolution, observée dans tous les pays, en fait des grands instruments de service à la communauté scientifique dans son ensemble et donc des très grands équipements "*pas comme les autres*".

On peut schématiser cette évolution en trois phases pour la commodité de l'exposé.

Conçus et gérés par des physiciens des particules et des spécialistes des accélérateurs, les synchrotrons ont d'abord fonctionné en vase clos, pendant toute la première phase qui a correspondu à la mise au point de la première génération d'anneaux de stockage.

Mais les synchrotrons ont bientôt, dans une deuxième phase, constitué une base de travail pour des physiciens, des chimistes et des biologistes qui ont développé, sur place et en liaison avec les spécialistes des machines, des méthodes expérimentales pour tirer parti des qualités exceptionnelles des rayonnements électromagnétiques produits par les synchrotrons de première puis de deuxième génération.

La troisième phase correspond à l'ouverture très rapide des lignes de lumière - une fois celles-ci mises au point - à des chercheurs appartenant à des laboratoires extérieurs, ce qui a fait en définitive des synchrotrons des machines de service desservant une communauté très large d'utilisateurs, au plan régional, national et international.

Par nature, un synchrotron est donc un grand instrument particulier, *partagé* par des utilisateurs de toute discipline et non pas fermé sur une communauté de spécialistes, *accessible* à tous grâce à une assistance technique et non pas inaccessible de par sa complexité, et, enfin, jouant un rôle *formateur* pour des chercheurs même au niveau de mémoires de recherche de maîtrise ou de DEA et non pas réservé à des thésards, à des post-docs et à des chercheurs chevronnés

Mais, en France, des contraintes de technique budgétaire mal maîtrisées ont fait ranger les synchrotrons dans la catégorie des très grands équipements. Ceci a été d'autant plus inévitable qu'aucun découplage n'a été opéré à quelque niveau que ce soit, ministère de la

recherche, grands organismes et laboratoires, entre les équipements de base – injecteur, anneau de stockage – et les équipements optionnels – dispositifs d'insertion et instrumentation des lignes de lumière –, ce qui aurait dû être fait compte tenu des finalités très différentes de ceux-ci.

Pour autant, les synchrotrons méritent bien d'être considérés comme des grands instruments "*pas comme les autres*".

1. Une communauté indissociable d'instruments, de compétences pluridisciplinaires et de formations par la recherche

1. 1. Des compétences multiples de physiciens et de concepteurs au service de la machine et de ses utilisateurs

En raison de leur complexité, les synchrotrons nécessitent que des équipes d'ingénieurs, de techniciens et de physiciens assurent leur fonctionnement par une présence quotidienne. Toutefois, il s'agit dans tous les cas d'une exploitation non pas routinière mais dynamique, car tous les synchrotrons ont des marges de progression importantes, notamment au niveau des dispositifs d'insertion et de l'instrumentation des lignes de lumière.

A titre indicatif, le laboratoire HASYLAB de Hambourg alloue 17 % de ses crédits annuels de fonctionnement au perfectionnement permanent de ses installations.

Le LURE quant à lui est l'auteur d'un nombre important de grandes premières technologiques et méthodologiques qui ont ouvert de nouveaux champs d'application au rayonnement synchrotron.

Dans le domaine de la cristallographie biologique, le LURE a mis en service d'une part la première chambre à rotation pour l'enregistrement des diagrammes de diffraction en 1976, et, d'autre part, des détecteurs de type chambre à fils construits avec M. Georges CHARPAK au CERN en 1984. En outre, grande première mondiale, la première structure d'une protéine inconnue a été résolue au LURE en 1985 par la méthode de diffusion anormale multilongueurs d'onde (MAD).

Le LURE a également été pionnier pour la mise au point des onduleurs dont l'importance est capitale pour les synchrotrons de 3^{ème} génération et pour la démonstration des lasers à électrons libres.

Dans le domaine des techniques expérimentales d'application, un synchrotron comme le LURE a été également à la base de nouveaux

développements, comme pour la microscopie infrarouge, les UV à polarisation ajustable ou les microsondes X par fluorescence.

On ne peut donc considérer un synchrotron comme un outil figé, condamné à l'obsolescence dès la fin de sa construction. Au contraire, il s'agit d'une machine qui connaît une évolution permanente pour améliorer ses performances, développer de nouvelles techniques d'imagerie et perfectionner les services rendus aux utilisateurs.

Au reste, un autre trait important des synchrotrons est l'assistance très rapprochée donnée aux utilisateurs, permanents ou visiteurs, par les concepteurs et les gestionnaires de la machine.

La complexité du synchrotron en est la cause première. Mais il s'agit aussi d'une question de philosophie de la recherche conduite autour des synchrotrons, dont les responsables mettent la pluridisciplinarité au premier rang de leurs préoccupations.

De fait, l'histoire du rayonnement synchrotron est par essence pluridisciplinaire.

C'est évidemment une partie très importante du travail des physiciens que de concevoir des instruments pour les mettre au service des autres disciplines scientifiques. Il se trouve que sur un site de synchrotron, l'interaction est permanente et productive grâce au nombre et à l'importance des contacts entre les spécialistes de la machine et ses utilisateurs.

1.2. Un rôle dans la formation à la recherche

Le rôle des synchrotrons dans la formation des jeunes chercheurs fait également partie intégrante de leur mode de fonctionnement, quel que soit le pays considéré.

Ainsi, le LURE assume un rôle important dans la formation universitaire. Il est le siège de 2 DEA et le laboratoire d'accueil de 6 écoles doctorales. Le LURE accueille en outre chaque année, une quarantaine de stagiaires de niveau licence, maîtrise ou DEA.

En outre, chaque année, le LURE reçoit les 60 doctorants de la formation doctorale européenne HERCULES. Une quarantaine de chercheurs préparent leur thèse de doctorat au LURE. En 1999, 386 doctorants ont utilisé les faisceaux du LURE en tant que chercheurs visiteurs.

Aux Etats-Unis, selon le rapport Birgeneau, 100 doctorats (Ph.D.) par an ont eu pour base des recherches conduites sur les synchrotrons SSRL de Stanford University (Stanford, Californie) et NSLS du Brookhaven National Laboratory (Upton, New York). Le même rapport indique qu'avec le démarrage de la recherche sur l'ALS du Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, Californie) en 1993 et sur l'APS de l'Argonne National Laboratory (Argonne, Illinois) en 1996, ce nombre de thèses est appelé à s'accroître considérablement.

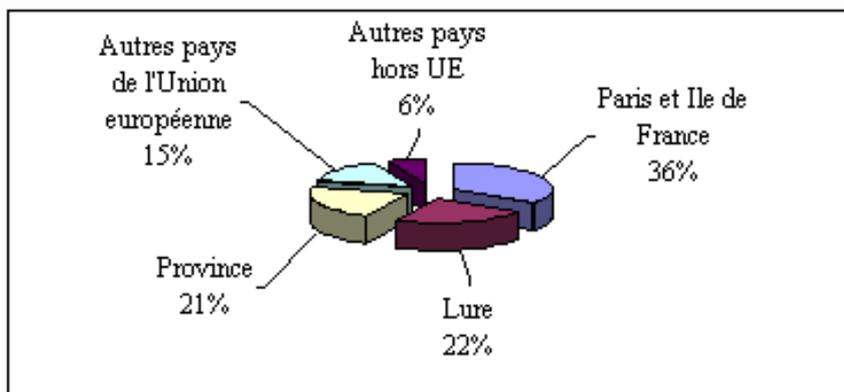
De même, les étudiants présents au Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) de Hambourg qui possède les synchrotrons DORIS III et PETRA II, sont au nombre de 1130 personnes, en maîtrise, en doctorat ou en contrat de " *post-doc* ".

2. Créant un effet de communauté et une fertilisation croisée, un grand instrument pas comme les autres

L'une des caractéristiques essentielles des synchrotrons est qu'ils desservent un nombre très important de laboratoires extérieurs au site de la machine. De fait, un synchrotron irrigue l'ensemble d'un territoire, d'une région, voire d'un continent.

Ainsi, les statistiques du LURE pour 1999 montrent que les laboratoires du site n'ont reçu que 22 % des projets acceptés, les 78 % restant ayant été utilisés par les autres laboratoires d'Ile de France (36 %), de province (21 %), et de pays étrangers (21 %), ainsi que l'illustre la figure suivante.

Figure 5 : Répartition de l'utilisation des synchrotrons DCI et Super-ACO entre les laboratoires " *maison* " du LURE et les laboratoires extérieurs en 1999



Le nombre d'expériences effectuées au LURE s'élève à plus de 600 par an et le nombre d'utilisateurs à plus de 2000. Quant à l'ESRF, il a reçu 2640 utilisateurs sur la période juillet 1997-juillet 1998.

On retrouve les mêmes ordres de grandeur au Hasylab de Hambourg, avec plus de 2100 utilisateurs par an. En Suède, les installations du MaxLab sont utilisées annuellement par environ 500 personnes.

La notion de service rendu par les synchrotrons est évidemment aussi présente aux Etats-Unis, avec, par exemple, un ensemble de 4500 utilisateurs sur les 4 synchrotrons du DOE et une influence régionale de chaque machine.

Il n'est donc pas abusif de dire que, d'une manière générale, les synchrotrons sont des "*super laboratoires*" de service aux autres laboratoires. Les chercheurs visiteurs se relaient sur les lignes de lumière afin de procéder aux expérimentations prévues dans les projets de recherche acceptés par les comités de programme.

Il faut d'autre part remarquer qu'un nouveau marché se développe pour les synchrotrons, celui des accès payants et sous délai réduit que les grandes entreprises souhaitent obtenir en cas d'urgence ou pour assurer une confidentialité totale à leurs travaux. L'ESRF devrait ainsi vendre en 2000 environ 4500 heures de temps de faisceau, pour des recettes de l'ordre de 10 millions de francs.

A cet égard, l'automatisation des manipulations préalables à la réalisation des clichés ainsi que la récupération des données par voie informatique sont en projet à l'ESRF, de façon à réduire, si nécessaire, les temps de présence des utilisateurs voire même de leur permettre d'envoyer leurs échantillons et de récupérer les données à distance. Les voies du libre-service sinon du service à distance figurent ainsi dans les évolutions envisagées pour certaines expérimentations, confirmant bien la vocation des synchrotrons d'être au service de toute une communauté de chercheurs.

" *Super laboratoire* " pluridisciplinaire de service aux autres laboratoires, un synchrotron n'est donc pas un très grand instrument comme les autres qui sont le plus souvent au service d'une seule discipline.

Le LURE qui a la responsabilité des machines Linac, DCI, Super-ACO et CLIO, possède ainsi 7 sections et groupes scientifiques : atomes et molécules, biologie, chimie de la matière condensée, diffusion-diffraction, optique et faisceaux d'électrons, physique du solide et surfaces.

La pluridisciplinarité des équipes du LURE existe depuis les origines. Une même situation s'observe dans les autres centres de rayonnement synchrotron.

3. Un bilan substantiel en termes de découvertes et d'inventions

Le bilan scientifique des grands instruments est à l'heure actuelle un thème de discussions d'autant plus vives qu'elles sont reprises dans les médias.

S'agissant des synchrotrons, il est aisé de démontrer leur intervention dans un grand nombre de découvertes, puisque la citation de l'instrument ou celle des équipes du synchrotron qui ont collaboré à celles-ci, est systématiquement faite.

On trouvera ci-après un bilan des publications d'un centre de rayonnement synchrotron comme le LURE sur 5 ans.

Tableau 2 : Publications du LURE sur la période 1995-1999

1995-1999	nombre
Alert papers dans Structure	458
dont :	
- Articles dans Science	3
- Articles dans Nature	7
- Articles dans Physical Review Letters	44
- Articles dans Cell	3

Au plan qualitatif, on peut citer, parmi les grandes premières mondiales réalisées grâce aux synchrotrons l'élucidation de la structure complète d'un virus, la structure du nucléosome, l'étude de l'hydrogène et de la glace à des pressions très élevées (1 à 2 Mbars) et l'imagerie en lumière cohérente. On peut aussi signaler les études temporelles à l'échelle de 100 picosecondes (10^{-12} s) dont celle de l'action du CO sur la myoglobine.

En outre, le rayonnement synchrotron a joué un rôle essentiel dans la mise au point des antiprotéases du VIH, dans celle de médicaments contre le glaucome, l'hypertension, la grippe ou le cancer.

Les synchrotrons, en tant que fournisseurs de nouvelles techniques d'analyse, ont bien ouvert de nouveaux champs de connaissance, de découverte et d'invention. Leur apport d'information en chimie, en physique, en science des matériaux, en sciences de la vie, en géosciences et en science de l'environnement, continuera d'être capital dans l'avenir.

III – DES BESOINS D'ACCÈS EN CROISSANCE FORTE

Les performances des faisceaux des synchrotrons ont ouvert de nouveaux champs de connaissance. C'est la raison essentielle de leur utilisation croissante.

Pour toute technologie en développement, l'estimation des débouchés futurs est toujours difficile à réaliser.

Par hypothèse, l'interrogation des utilisateurs risque de conduire à une surestimation des besoins. A l'inverse, une enquête sur les investissements ou les dépenses prévues par les utilisateurs réels et potentiels peut conduire à une sous-estimation des besoins réels, dans la mesure où l'importance relative de l'innovation n'est pas perçue clairement et où la valorisation financière peut être dissuasive.

Pour autant, il ne semble pas que l'on puisse légitimement dire aujourd'hui qu'il n'y a pas d'indices fiables sur les besoins futurs en temps de faisceau.

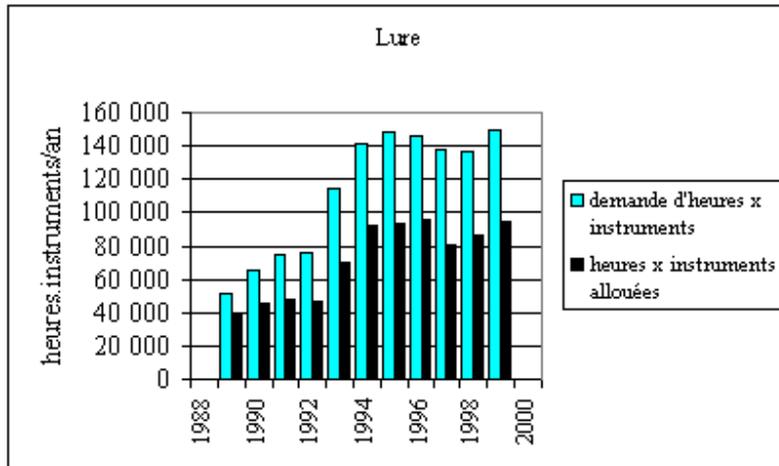
S'agissant du rayonnement synchrotron, les prévisions doivent aussi opérer une distinction entre les deux principales gammes de longueurs d'onde : VUV – X " *mous* " d'une part, et X – X " *durs* " d'autre part. Là encore, différentes évaluations existent, qui permettent de cerner les contours de l'évolution future.

1. L'insuffisance actuelle de l'offre française de rayonnement synchrotron

Les nombreuses données statistiques qui existent de par le monde sur les demandes d'accès aux lignes de lumière des synchrotrons, montrent un écart significatif entre le nombre de demandes présentées et le nombre de demandes acceptées.

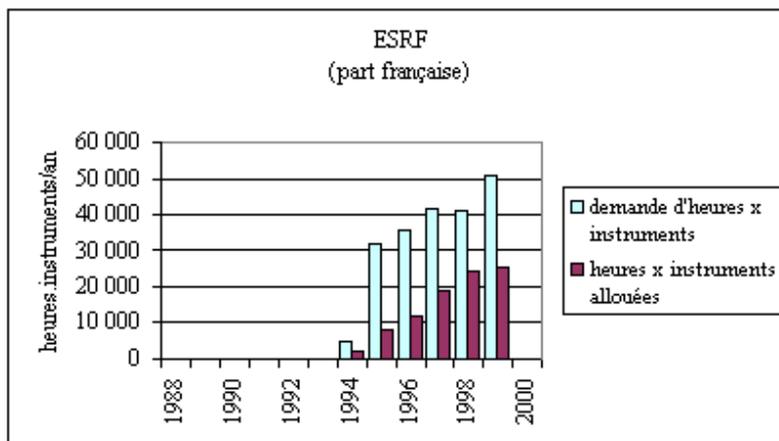
Ainsi, en 1999, la demande exprimée en (heures x instruments) adressée au LURE a représenté 155 % du temps alloué, un pourcentage à peu près stabilisé cinq ans après la mise en service des équipements (voir figure suivante).

Figure 6 : Ecart entre la demande exprimée en (heures x instruments) et l'allocation effective au LURE



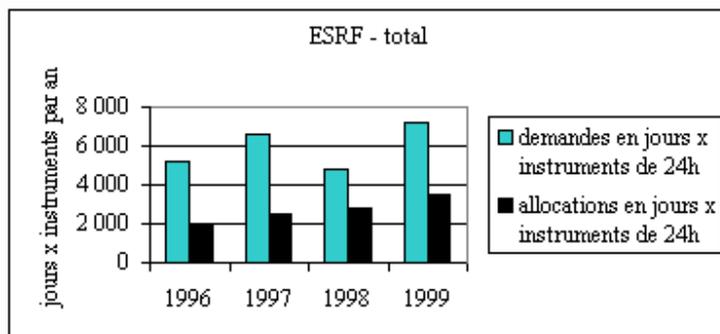
Le même écart s'est élevé à 205 % pour la part française de l'ESRF, cinq ans après la mise en service de l'appareil (voir figure suivante).

Figure 7 : Ecart entre la demande exprimée en heures x instruments et l'allocation effective à l'ESRF (part française)



La même insuffisance se constate pour l'ESRF considéré dans son ensemble (voir figure suivante). En 1999, la demande de (jours x instruments) a atteint 210 % de l'allocation effective.

Figure 8 : Ecart entre la demande exprimée en (jours x instruments) et l'allocation effective à l'ESRF considéré dans son ensemble



D'après le Président de la Table ronde européenne du rayonnement synchrotron, M. Giorgio MARGARITONDO, la demande de temps d'accès à des lignes de lumière est en moyenne supérieure de 150 % à l'offre disponible. Dans le cas particulier du synchrotron italien ELETTRA implanté à Trieste, la demande d'accès atteint même 260 % de l'offre.

La discussion de ces indicateurs ne ruine pas leur pertinence.

Il est évident qu'une nouvelle technique tend à révéler des besoins et que ceux-ci se multiplient au fur et à mesure qu'elle est mieux connue. Toutefois, la persistance d'un déficit entre l'offre et la demande après cinq années semble établir une insuffisance chronique des ressources disponibles en France, au LURE et à l'ESRF.

On pourrait également se demander si l'écart entre les demandes présentées et les demandes acceptées ne provient pas d'une insuffisance de qualité des demandes.

D'après les indications données à vos Rapporteurs lors des visites des différents centres de rayonnement synchrotron qu'ils ont visités, la raison dominante des refus d'accès est, non pas l'insuffisante qualité scientifique des demandes jugée par un comité de programme opérant une sélection des projets, mais bien une insuffisance des capacités disponibles.

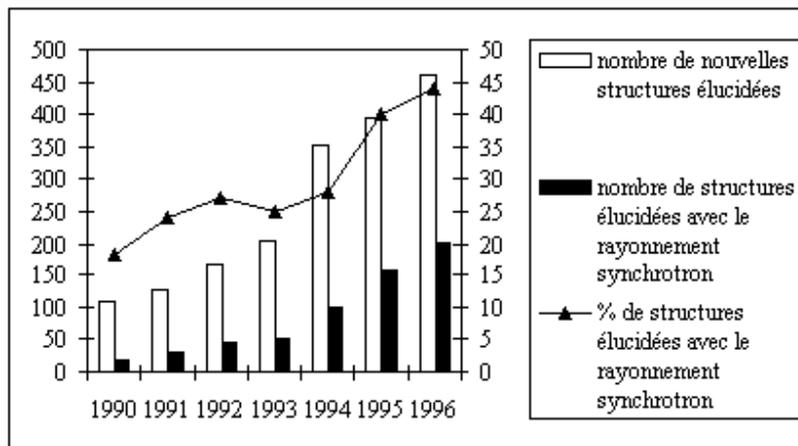
En tout état de cause, alors que les techniques mises en œuvre sur les synchrotrons continuent de progresser en termes de performances, on ne voit pas que l'écart entre l'offre et la demande puisse se résorber dans les années à venir, à nombre de synchrotrons constants.

Au contraire, si les deux sources LURE et SRS devaient disparaître au profit du seul synchrotron DIAMOND, l'insuffisance de lignes de lumière ne pourrait que s'approfondir.

C'est ce qu'a exprimé le Président de la Table ronde européenne en indiquant, d'une part, qu'il existe un déficit en Europe en termes de lignes de lumière disponibles et, d'autre part, que la disparition sans remplacement un pour un des sources LURE et SRS serait un " *changement radical* " en Europe.

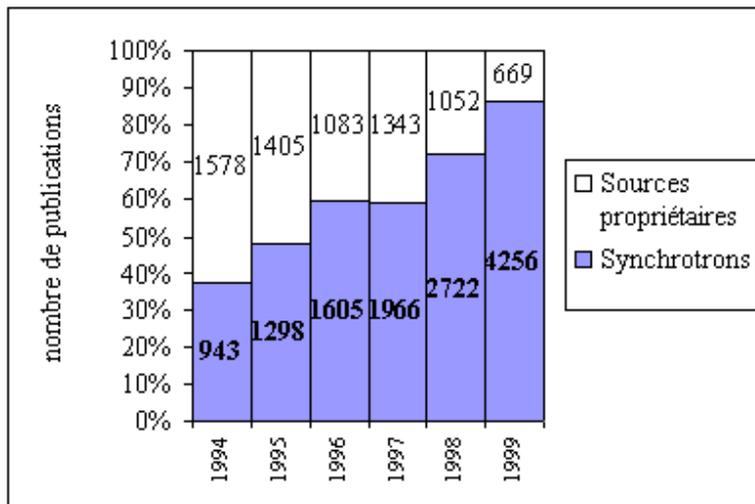
Une raison fondamentale en est l'utilisation croissante du rayonnement synchrotron pour établir la structure des macromolécules (voir graphique suivant).

Figure 9 : L'importance croissante du rayonnement synchrotron pour l'élucidation des structures macromoléculaires



Ce phénomène est particulièrement accentué dans le domaine de la biologie. La résolution des structures des protéines qui pouvait s'effectuer avec des instruments de laboratoires, bascule, dans tous les pays, vers les synchrotrons, ainsi qu'en témoigne le graphique suivant réalisé par le laboratoire de l'EMBL (European Molecular Biology Laboratory) implanté sur le site des synchrotrons du Hasylab de Hambourg.

Figure 10 : Comparaison du total mondial de publications de biologie structurale résultant de travaux conduits sur des synchrotrons ou sur des sources propriétaires



Les raisons de ce recours accru aux synchrotrons sont bien connues. La qualité des images obtenues et la rapidité d'exécution des clichés coïncident avec les impératifs de la recherche moderne engagée en biologie moléculaire dans une course de vitesse, accélérée par la concurrence et par les perspectives de la brevetabilité du vivant.

Au demeurant, si des statistiques comparables ne semblent pas disponibles pour les autres disciplines, il est incontestable que les sciences physiques ont, elles aussi, multiplié leur appel aux synchrotrons.

2. Les prévisions des besoins futurs

La prévision des besoins futurs en matière de rayonnement synchrotron est un exercice difficile. Néanmoins, plusieurs approches ont été développées dans les années récentes, qui donnent des indications à prendre en considération.

L'une des plus intéressantes est celle présentée par M. Yves FARGE, qui possède une expérience de la recherche à la fois universitaire et industrielle.

La capacité souhaitable à 20 ans pour la France, telle qu'elle est estimée par M. Yves FARGE, devrait être multipliée par près de 2, par rapport à la situation actuelle qui repose exclusivement, comme on sait, sur les deux sources du LURE, DCI et Super-ACO.

Ce sont les besoins en temps de faisceau des sciences de la vie qui devraient croître le plus vite. Cette indication quantifiée est recoupée par les nombreuses observations qualitatives rassemblées par vos

Rapporteurs. La cristallographie des protéines mais aussi les autres techniques appliquées à la biologie sont en effet la source de demandes d'accès en croissance forte qui, selon toute vraisemblance, devrait se prolonger.

On notera aussi que la recherche appliquée et les sciences de l'univers devraient doubler leurs demandes dans les 20 années à venir. La physique et la chimie augmenteraient les leurs respectivement d'un facteur de 1,2 et 1,5.

Tableau 3 : Estimation des capacités annuelles souhaitables en France à 20 ans

nombre de projets	capacité annuelle actuelle	estimation de la capacité souhaitable à 20 ans	facteur multiplicatif
Sciences de la vie	80	240	3
Sciences de l'univers	40	80	2
Recherche appliquée (dont micro-fabrication)	320	640	2
Chimie	160	240	1,5
Physique	200	240	1,2
Total	800	1440	1,8

Il paraît également utile d'indiquer que le rapport Birgeneau relatif aux synchrotrons du Département de l'énergie américain estime que *"la croissance du nombre d'utilisateurs des synchrotrons et plus particulièrement leur diversification croissante continuera au moins dans la prochaine décade et que les ressources correspondantes doivent leur être fournies "*.

Une discussion des éléments précédents est néanmoins nécessaire, dans la mesure où plusieurs facteurs conditionnent les perspectives tracées précédemment.

La pénétration des techniques développées avec les synchrotrons dans le milieu scientifique entraîne un double effet.

La qualité des résultats obtenus avec les lignes de lumière d'un synchrotron exerce un effet incitatif puissant, au demeurant largement relayé par leur publication dans des revues prestigieuses comme Nature et Science. Les difficultés d'accès aux synchrotrons, à savoir la nécessité de construire un projet de recherche, d'en faire un rapport et de le soumettre à un comité de programmes et les délais d'obtention d'une réponse, peuvent au contraire exercer un effet dissuasif et conduire les chercheurs à trouver d'autres moyens techniques.

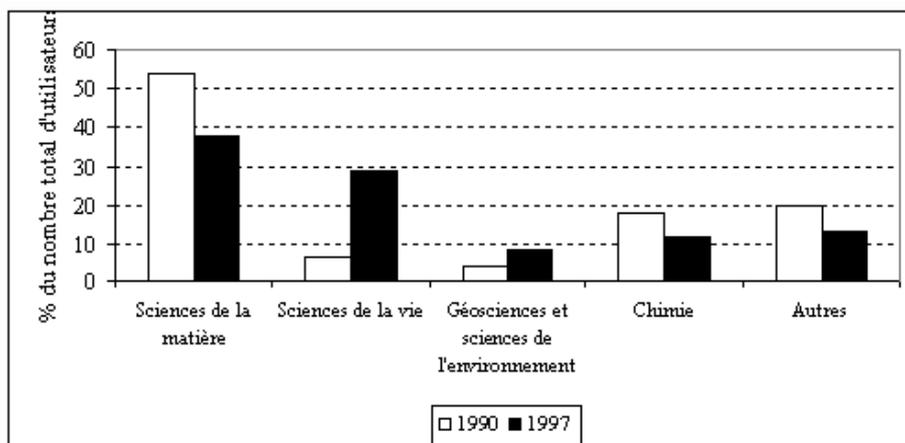
Un autre facteur difficile à cerner est celui de la concurrence de l'amélioration de techniques actuelles ou de techniques nouvelles qui pourraient surgir dans l'intervalle de temps considéré.

Par ailleurs, certains observateurs ont pu avancer que la croissance des besoins de la biologie masquait une diminution des demandes des autres disciplines. En réalité, il n'en est rien car cette évolution se place dans le cadre d'une évolution globale d'augmentation du nombre d'utilisateurs, toutes disciplines confondues, y compris en cas d'augmentation du nombre de lignes disponibles.

A cet égard, l'évolution des Etats-Unis est particulièrement intéressante à examiner entre 1990 et 1997. Aux deux synchrotrons de 2^{ème} génération gérés par le Department of Energy – Basic Energy Sciences, se sont en effet ajoutés deux synchrotrons supplémentaires de 3^{ème} génération.

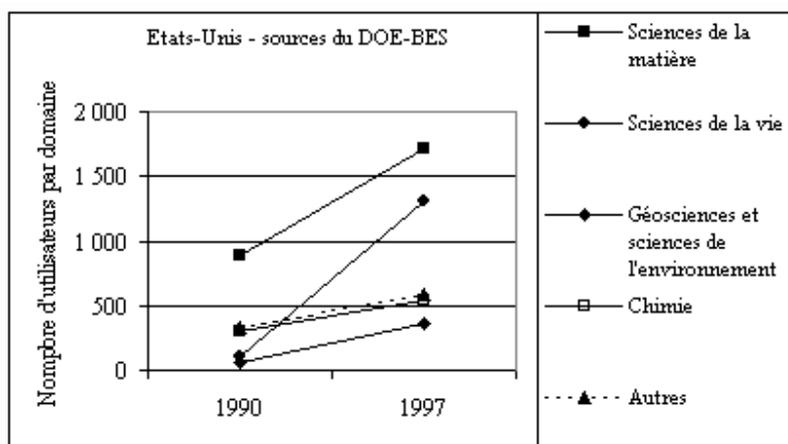
Une première évolution s'est alors produite : l'envolée de la part des travaux des sciences de la vie et des géosciences et des sciences de l'environnement, selon le graphique suivant.

Figure 11 : Evolution des parts respectives des différentes disciplines dans l'utilisation des synchrotrons du DOE (Etats-Unis)



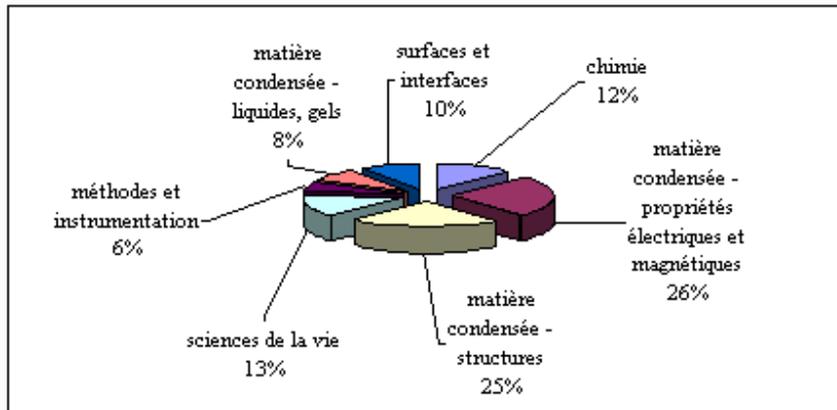
Mais une autre évolution tout aussi importante est intervenue, à savoir la croissance globale du nombre d'utilisateurs. Ainsi, le nombre d'utilisateurs est passé de 1642 en 1990 à plus de 4500 en 1997, avec un accroissement observé dans toutes les disciplines (voir figure suivante).

Figure 12 : Evolution du nombre d'utilisateurs par discipline pour les synchrotrons du DOE-BES aux Etats-Unis,



Au demeurant, l'expérience de l'ESRF, un synchrotron de 3^{ème} génération de 6 GeV préfigure dans une certaine mesure, le partage des activités des nouvelles machines qui pourront être construites avec des performances voisines pour des énergies inférieures de moitié.

Figure 13 : Répartition du temps machine de l'ESRF en 1997-1998 par champ scientifique



On voit donc que, même avec un synchrotron de grande énergie, particulièrement bien placé dans le domaine des sciences de la vie, celles-ci représentent entre 1/7 et 1/8 du temps alloué.

D'autres disciplines que la biologie moléculaire ont donc besoin de rayons X –X "durs" et doivent être prises en compte dans tout projet de nouveau synchrotron.

3. Les besoins en différentes gammes de longueurs d'onde

Dans l'analyse des besoins futurs en rayonnement synchrotron, un sujet est particulièrement important, c'est celui de la répartition entre ce que l'on peut appeler schématiquement les rayons VUV – X "mous" et les rayons X –X "durs". A la question des longueurs d'onde, s'est greffée la question des besoins comparés des différentes disciplines, souvent d'ailleurs d'une manière impropre, de sorte qu'il semble important de l'examiner en détail.

Pour simplifier, on dira d'une part que les rayonnements électromagnétiques de la gamme VUV –X "mous" sont produits par des synchrotrons d'énergie faible ou moyenne, et sont principalement utilisés pour les études de surface ou la dynamique des macromolécules.

On dira d'autre part que la gamme X – X "durs" nécessite un synchrotron d'une énergie plus élevée et permet les études de la matière en volume et de la structure détaillée des molécules.

L'évaluation des besoins selon la gamme des longueurs d'onde est donc importante pour la détermination des caractéristiques d'un projet de synchrotron.

Selon M. Paul CLAVIN, " les besoins prioritaires des 20 prochaines années, notamment pour la cristallographie des protéines en biologie structurale, nécessiteront une augmentation des postes d'expériences en rayons X – X " durs " issus d'éléments d'insertion sur des sources de 3^{ème} génération, de préférence de plus de 2,5 GeV. C'est du moins l'opinion générale à la mi-1999 ".

Lors de son audition par vos Rapporteurs, M. Paul CLAVIN a indiqué que les responsables britanniques et américains s'attendent que les besoins en X – X " durs " croissent jusqu'à représenter 80 % de l'activité totale en rayonnement synchrotron dans les 20 ans à venir, l'essentiel du glissement devant être le fait des utilisations pour la biologie structurale.

L'évaluation fournie à vos Rapporteurs par M. Yves FARGE n'est pas éloignée, si les causes en sont différentes. Dans les 20 prochaines années, les demandes porteront à 70 % sur les rayons X proprement dits et à 30 % sur les rayons X " mous ". Pour M. Yves FARGE, la raison fondamentale de cette évolution est que toutes les disciplines, et pas seulement la biologie, font un appel croissant à des rayonnements qui puissent pénétrer la matière.

Pour M. Yves PETROFF, la répartition devrait être de 60 % pour les rayons X – X " durs " et de 40 % pour les rayons UV et X " mous ".

Par ailleurs, la priorité recommandée aux Etats-Unis par le rapport Birgeneau est de financer l'amélioration des synchrotrons produisant des rayons X - X " durs ".

En tout état de cause, il ne faut pas déduire des chiffres précédents que la biologie structurale représentera l'application la plus importante du rayonnement synchrotron, même dans la gamme des rayons X.

Selon M. Yves PETROFF, les sciences physiques devraient représenter 70 % du temps de faisceau en rayons X. Au reste, on peut estimer que les progrès des détecteurs et une automatisation au moins partielle des manipulations viendront diminuer les temps d'immobilisation des stations expérimentales spécialisées dans la cristallographie des protéines. Par ailleurs, les rayons VUV – X " mous " sont également utilisés par la biologie.

Pour l'ensemble de ces raisons, l'estimation de 2/3 pour les X – X " durs " et 1/3 pour les UV – X " mous " paraît à retenir pour les besoins en différents types de rayonnements produits par les synchrotrons.

4. La concurrence des autres méthodes d'analyse fine de la matière

Une autre question a été abordée à de multiples reprises par vos Rapporteurs, à savoir la concurrence actuelle ou potentielle d'autres méthodes d'analyse fine de la matière, qui pourraient éventuellement se substituer au rayonnement synchrotron.

A cet égard, deux points sont essentiels, d'une part l'avenir de la méthode dite de résonance magnétique nucléaire (RMN) et d'autre part la question générale de la complémentarité ou de la concurrence des différentes techniques d'analyse fine de la matière.

4.1. La résonance magnétique nucléaire

L'avenir de la résonance magnétique nucléaire, ses avantages et ses inconvénients par rapport au rayonnement synchrotron ont été abordés à plusieurs reprises par vos Rapporteurs avec différents interlocuteurs.

La RMN présente en effet l'avantage de permettre d'étudier les structures moléculaires en solution, sans qu'il soit nécessaire d'opérer une cristallisation préalable, au contraire de la cristallographie à rayons X produits par le synchrotron. Compte tenu des difficultés de la cristallisation des protéines, il s'agit d'un avantage évident pour les sciences du vivant. Un autre avantage de cette méthode est également de permettre l'étude des interactions des molécules avec leur solvant.

Toutefois, la RMN présente l'inconvénient de nécessiter que l'on synthétise les macromolécules à étudier en les enrichissant en atomes d'azote 14 et de carbone 13. Un deuxième inconvénient est de nécessiter la préparation d'échantillons de taille relativement importante. Par ailleurs, il s'agit d'une méthode qui ne délivre ses résultats qu'avec une certaine lenteur. Enfin, et c'est ce qui explique la préférence donnée au rayonnement synchrotron par un très grand nombre de laboratoires pharmaceutiques, la RMN ne peut pour l'instant déterminer les structures que de molécules ne dépassant pas la masse moléculaire de 30 000.

L'avenir de la RMN n'est pas pour autant fermé. La frontière des 600 MHz a déjà été franchie. Pour analyser la structure de molécules de masse moléculaire de 100 000, il faudrait atteindre 1 GHz. Certains pays, comme les Etats-Unis et le Japon, envisagent de constituer un réseau de machines à 600 MHz implantées dans les laboratoires et effectuant les travaux préliminaires au passage sur un équipement à 1 GHz. Deux types de critiques sont émis contre ces perspectives. D'une part, l'utilité de machines à 1 GHz est mise en doute par certains

experts. D'autre part, le passage à 1 GHz n'est pas attendu avant 5 à 10 ans, au minimum par d'autres experts.

Au total, la RMN apparaît devoir rester plus complémentaire que concurrente du rayonnement synchrotron.

En réalité, dans cet examen il faut aussi intégrer l'évolution technique des synchrotrons eux-mêmes, qui ne sauraient être considérés comme figés.

A cet égard, les prévisions établies par M. Yves FARGE, montrent que le nombre de projets qui devraient faire appel au rayonnement synchrotron en France dans les 20 ans qui viennent, devrait diminuer sur un synchrotron de 1^{ère} génération, augmenter d'un facteur de près de 6 sur un synchrotron de 2^{ème} génération et passer de 0 actuellement à 770 sur les synchrotrons de 3^{ème} génération.

Tableau 4 : Prévisions de capacités souhaitables en France à 20 ans selon la génération des synchrotrons considérés

nombre de projets	Capacité annuelle actuelle	Capacité annuelle souhaitable à 20 ans	facteur multiplicatif
Expérimentations sur synchrotron de 1 ^{ère} génération	480	320	0,7
Expérimentations sur synchrotron de 2 ^{ème} génération	120	670	5,6
Expérimentations sur synchrotron de 3 ^{ème} génération	0	770	

Si l'on prend comme hypothèse que la résonance magnétique nucléaire va progresser, il faut faire la même hypothèse pour le rayonnement synchrotron, dont les progrès viendront non seulement des dispositifs d'insertion comme les onduleurs, mais également de l'optique des lignes de lumière et de leur instrumentation, notamment au niveau des détecteurs.

En l'occurrence, la complémentarité actuelle de la RMN et du rayonnement synchrotron pourrait se confirmer à l'avenir, au fur et à mesure de leurs améliorations respectives.

Au reste, la complémentarité de ces deux méthodes semble valoir pour l'ensemble des méthodes d'analyse fine de la matière.

4.2. La complémentarité des méthodes d'analyse

Les nombreux avis rassemblés par vos Rapporteurs convergent sur le fait que les différentes méthodes d'analyse fine de la matière se complètent plutôt qu'elles ne s'excluent.

Ainsi, les lasers de puissance, les sources de neutrons, le rayonnement synchrotron et la résonance magnétique nucléaire, et bientôt les lasers à électrons libres, ne peuvent être considérés comme pouvant se substituer les uns aux autres. La raison en est que chacune de ces méthodes apporte des informations d'une nature et d'une utilité particulière, sous des conditions expérimentales au demeurant différentes.

En toute hypothèse, il semble peu probable qu'un saut technologique dans l'une ou l'autre des méthodes concurrentes du rayonnement synchrotron puisse menacer l'actuelle prédominance du rayonnement synchrotron et a fortiori le rendre obsolète.

Selon les informations rassemblées au Royaume Uni, au Rutherford Appleton Laboratory (Didcot), il semblerait au contraire que les recherches les plus innovantes combinent les expériences conduites avec plusieurs techniques, par exemple les sources de neutrons et le rayonnement synchrotron.

La conséquence pratique qui est tirée de cette évolution par le "*Central Laboratory of the Research Councils*" (CLRC) est de concentrer les grands instruments sur le site de Didcot, qui possède déjà la source de neutrons pulsés ISIS la plus puissante du monde, le laser de puissance Vulcain et aspire à accueillir non seulement le synchrotron de 3^{ème} génération DIAMOND mais également la future source européenne ESS de neutrons produits par spallation.

Au total, et conformément à l'évolution technique des dernières années, il semble plus probable que l'on assiste dans les dix à vingt années qui viennent au développement simultané des différentes méthodes d'analyse plutôt qu'à la disparition de l'une d'entre elle au profit des autres.

A cet égard, il n'est pas indifférent de noter que le rayonnement synchrotron continue d'évoluer à un rythme rapide avec des marges de progrès considérables.

IV – UN ÉQUIPEMENT JUGÉ INDISPENSABLE PAR DES PAYS DE TOUTE TAILLE, DES ETATS-UNIS À TAIWAN

Sur le seul continent européen, l'Italie dispose d'une source de 3^{ème} génération déjà saturée ; la Suisse termine la construction de son propre synchrotron jugé indispensable à sa recherche publique et à son industrie pharmaceutique ; la Suède possède trois synchrotrons diversifiés et l'Allemagne dispose de 5 centres de rayonnement synchrotron avec un total de 7 anneaux de stockage.

Tableau 5 : Synchrotrons européens en fonctionnement ou en construction

Pays	Installation	caractéristiques
Allemagne	<ul style="list-style-type: none"> • Karlsruhe : - ANKA(3^{ème} gén.) 	2,5 GeV en const. voc. ind. (micro et nano tech.)
	<ul style="list-style-type: none"> • Berlin : - BESSY I (2^{ème} gén.) - BESSY II (3^{ème} gén.) en fonct. 	arrêté 1,9 GeV, en fonct.
	<ul style="list-style-type: none"> • Dortmund : - DELTA 	1,5 GeV voc. universitaire.
	<ul style="list-style-type: none"> • Bonn : - ELSA 	1,5-3,5 GeV voc. universitaire
	<ul style="list-style-type: none"> • Hambourg (DESY) : - DORIS III (Hasylab) (2^{ème} gén.) 	- 4,5 GeV - 12 GeV

	<p>gén.)</p> <ul style="list-style-type: none"> - PETRA II (Hasylab) (2^{ème} gén.) 	
Danemark	<ul style="list-style-type: none"> • ASTRID (ISA, Aarhus) 	
Espagne	<ul style="list-style-type: none"> • Catalonia SR Lab (Barcelone) 	en projet
France	<ul style="list-style-type: none"> • DCI (LURE, Orsay) (1^{ère} gén.) • Super-ACO (LURE, Orsay) (2^{ème} gén.) • ESRF (Grenoble) (3^{ème} gén.) <p>en coopération internationale</p> <p>(part de la France : 27,5 %)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 1,85 GeV • 0,8 GeV • 6 GeV
Italie	<ul style="list-style-type: none"> • ELETTRA (Trieste) (3^{ème} gén.) 	• 1,9 GeV (en fonct.)
Pays-Bas	<ul style="list-style-type: none"> • AmPS (Amsterdam) • EUTERPE (Tech. Univ. Eindh., Eindhoven) 	
Royaume Uni	<ul style="list-style-type: none"> • SRS (Daresbury) • DIAMOND en projet 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 GeV • 3 GeV
Suède	<ul style="list-style-type: none"> • MAX I (Lund) (2^{ème} gén.) • MAX II (Lund) (3^{ème} gén.) • MAX III (Lund) (3^{ème} gén.) • X-Ray (Uppsala) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,55 GeV • 1,5 GeV • 0,7 GeV (en constr.)

Suisse	• SLS (a project at PSI) (3 ^{ème} gén.)	• 2,4 GeV (en constr.)
--------	--	------------------------

La Russie et l'Ukraine possèdent également des installations remarquables.

Tableau 6 : Synchrotrons en Russie et en Ukraine

Pays	Installation	caractéristiques
Russie	• Siberia I (Kurchatov Inst, Moscou)	• 0,45 GeV
	• Siberia II (Kurchatov Inst, Moscou)	• 2,5 GeV
	• Siberia-SM (BINP, Novosibirsk)	• 0,8 GeV
	• TNK (F.V. Lukin Inst., Zelenograd)	• 1,2-1,6 GeV
	• VEPP-2M (BINP, Novosibirsk)	• 0,7 GeV
	• VEPP-3 (BINP, Novosibirsk)	• 2,2 GeV
	• VEPP-4 (BINP, Novosibirsk)	• 5-7 GeV
Ukraine	• ISI-800 (UNSC, Kiev)	• 0,7-1 GeV
	• Pulse Stretcher/Synch. Rad. (Kharkov)	• 0,75–2 GeV

Sur d'autres continents, le Canada va construire sa propre source, alors que les Etats-Unis voisins disposent pourtant de 11 centres de rayonnement synchrotron.

On peut noter, à cet égard, que l'énergie choisie pour le futur synchrotron canadien est de 2,5-2,9 GeV, soit un niveau équivalent à celui de SOLEIL.

Tableau 7 : Synchrotrons en fonctionnement ou en construction

en Amérique du Nord et du Sud

Pays	Installation	caractéristiques
------	--------------	------------------

Etats-Unis	<ul style="list-style-type: none"> • ALS (LBL, Berkeley, CA) (3^{ème} gén.) • APS (Argonne, Chicago, IL USA) (3^{ème} gén.) • CAMD (Louisiana State University, Baton Rouge, LA) • CHESS (Ithaca, NY) • DFELL (Duke University, Durham, NC) 2^{ème} (->3) • NC STAR (N. Carolina State Univ.) 2^{ème} (->3) • NSLS I (BNL, Brookhaven, NY) – rénovation en cours • NSLS II (BNL, Brookhaven, NY) – rénovation en cours • 2^{ème} (->3) • SSRL (Stanford) – rénovation en cours • SURF II (Gaithersburg) • UW Synchrotron Radiation Center (Stoughton, WI) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,9 GeV • 7 GeV • 1,4 GeV • 5,5 GeV • 1-1,3 GeV • 0,8 GeV • 2,5-2,8 GeV • 3 GeV • 0,4 GeV • 0,8-1 GeV
Canada	<ul style="list-style-type: none"> • CLS (Canadian Light Source, Saskatoon) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2,5-2,9 GeV en constr.
Brésil	<ul style="list-style-type: none"> • LNLS-II (2^{ème} gén.) 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 GeV en fonct.

En Asie, le Japon exploite 16 synchrotrons. Certains sont possédés et gérés en propre par des universités – universités de Tokyo, Kyoto, Hiroshima – ou des grands groupes d’entreprises comme Sumitomo.

Tableau 8 : Synchrotrons en fonctionnement ou en construction dans le reste du monde

Pays	Installation	caractéristiques
Chine	<ul style="list-style-type: none"> • BSRF/BEPC (Inst High En. Phys.,Beijing) • BLS (Inst High En. Phys.,Beijing) • NSRL (Univ. Sci. Tech. of China, Hefei) • SSRF (Inst. Nucl. Res., Shanghai) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,5-2,2 GeV • 2,2-2,5 GeV • 0,8 GeV • 3,5 GeV
Corée du Sud	<ul style="list-style-type: none"> • CESS (Seoul Nat. Univ., Seoul) • Pohang Light Source (Pohang) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,1 GeV • 2 GeV
Inde	<ul style="list-style-type: none"> • INDUS-I (Ctr. Adv. Tech., Indore) • INDUS-II (Ctr. Adv. Tech., Indore) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,45 GeV • 2 GeV
Japon	<ul style="list-style-type: none"> • Accumulator Ring (KEK, Tsukuba) • AURORA (Ritsumaiken Univ,Kusatsu) • HBLS (Univ. of Tokyo-ISSP,Kashiwa) • HISOR (Hiroshima Univ, Hiroshima) Kansai SR (Osaka) • KSR (Kyoto University,Kyoto) • Nano-hana (Japan SOR Inc, Ichihara) • NIJI II (Electro Tech. Lab, 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 GeV • 0,575 GeV • 1-1,6 GeV • 0,7 GeV • 0,3 GeV • 1,5-2 GeV • 0,6 GeV • 0,6 GeV • 0,5 GeV • 1,5-2 GeV

	Tsukuba) <ul style="list-style-type: none"> • NIJI III (Sumitomo Electric, Nishi Harima) • NIJI IV (Electro Tech. Lab, Tsukuba) Photon Factory at KEK (Tsukuba) <ul style="list-style-type: none"> • SOR-Ring (U of Tokyo-ISSP, Tokyo) • SPring-8 (Sci. Tech. Agency, Nishi harima) • Subaru (Himeji Inst. Tech., Nishi Harima) • TERAS (Electro Tech. Lab, Tsukuba) • TLS (Tohoku Univ.Sendai) • UVSOR-I (Ins. Mol. Science, Okasaki) • UVSOR-II (Ins. Mol.Science, Okasaki) 	<ul style="list-style-type: none"> • 8 GeV • 1-1,5 GeV • 0,8 GeV • 1,5 GeV • 0,75 GeV • 7 GeV
Taiwan	• SRRC (Hsinchu)	• 1,3-1,5 GeV
Thaïlande	• SIAM (Suranaree Univ. of Tech., Nakhon Ratchasima)	• 1-1,3 GeV

On notera par ailleurs que Taiwan et la Thaïlande se sont dotés également de leurs propres équipements.

Ces instruments sont donc jugés par des pays de toute taille comme à leur portée.

Il n'existe donc logiquement dans le monde qu'un seul synchrotron international – l'ESRF de Grenoble – dont la construction a, au demeurant, correspondu à des contraintes techniques et financières aujourd'hui dépassées.

- CHAPITRE II – UNE COOPÉRATION INTERNATIONALE SOUHAITABLE POUR LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON, SUR DES BASES PROSPECTIVES ET ÉQUILIBRÉES

Introduction

Le Gouvernement est à l'heure actuelle engagé dans une négociation avec le Royaume Uni et une organisation privée ("*Charity Trust*") britannique, le Wellcome Trust, pour acquérir une participation dans le futur synchrotron de 3^{ème} génération DIAMOND.

Plusieurs arguments sont avancés par les pouvoirs publics en faveur de cette initiative. A ce stade de l'examen du dossier, on en retiendra deux.

D'une part, la conjonction des efforts des deux pays et la mise en commun des compétences des spécialistes anglais et français devraient permettre de parvenir à une meilleure machine qu'avec une démarche isolée, et de surcroît pour un coût par utilisateur inférieur.

D'autre part, le synchrotron DIAMOND devant être spécialisé dans la biologie structurale et implanté au Royaume Uni, deuxième nation après les Etats-Unis dans le palmarès mondial de la biologie moléculaire, le projet répondrait, par hypothèse, aux besoins prioritaires en ligne de lumière de la recherche française, tout en lui offrant l'occasion d'être tirée vers le haut par une coopération avec une recherche britannique traditionnellement forte dans le domaine biomédical.

Il ne saurait être question pour vos Rapporteurs de s'immiscer dans une négociation internationale en cours.

Il leur apparaît toutefois nécessaire de la replacer dans le cadre général d'une coopération internationale déjà forte dans le domaine du rayonnement synchrotron et de rappeler les engagements de la France vis-à-vis de la communauté scientifique européenne ou de celle des pays émergents.

Il convient également de s'interroger sur le type de recherche – fondamentale ou appliquée – et le type de grand instrument – de recherche ou de service - dont le cadre naturel est la coopération internationale.

Il s'agit enfin d'attirer l'attention du Gouvernement sur les limites de coût et d'efficacité qui doivent borner les efforts faits par la France pour trouver avec l'aide de partenaires européens les solutions qu'il lui appartient de mettre en œuvre pour la communauté scientifique nationale.

I – UNE COOPÉRATION INTERNATIONALE DÉJÀ ACTIVE OÙ LA FRANCE PEUT AMPLIFIER SON RÔLE DE PIVOT VIS-À-VIS DES PAYS DU SUD ET DE L'EST

La recherche scientifique est par nature une activité ouverte grâce au système de publications des résultats qui est le fondement de la carrière des chercheurs. Au reste, dans le cas de recherches précompétitives, c'est la rapidité d'exécution des applications et un progrès permanent qui constituent le principal moyen de protection de la propriété intellectuelle.

Le domaine des synchrotrons se singularise dans le monde de la recherche en ce qu'il ajoute à la dimension immatérielle de l'ouverture des résultats, celle d'une ouverture physique de ses installations à une large communauté d'utilisateurs. Les chercheurs de différents pays peuvent en effet accéder, sur le vaste réseau mondial des synchrotrons, aux machines les plus adaptées à leurs besoins expérimentaux. C'est peu dire, en conséquence, que la coopération internationale existe déjà dans le domaine des synchrotrons. Elle leur est consubstantielle.

1. Les coopérations internationales des synchrotrons et en particulier celles du LURE

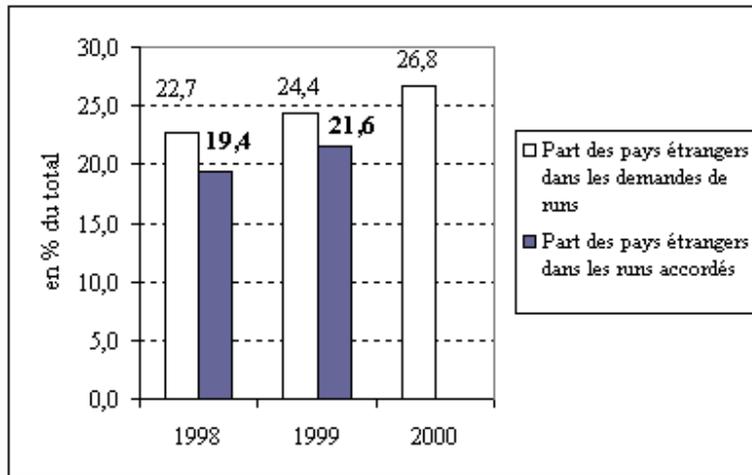
La plupart des synchrotrons dans le monde accueillent des chercheurs visiteurs étrangers qui viennent exploiter les points forts d'une machine particulière ou utiliser les créneaux libres sur un marché souvent saturé.

Le Hasylab de Hambourg pour sa part accueille 33 % de chercheurs étrangers sur ses installations. Ce pourcentage s'élève à 50 % pour les synchrotrons MAX I, II et III du MaxLab de l'université de Lund en Suède, en raison de la coopération scientifique étroite existant entre les pays scandinaves.

L'ouverture sur l'étranger du LURE d'Orsay provient d'une part de l'utilisation de ses installations par des chercheurs étrangers pour la réalisation de leurs projets de recherche et d'autre part des liens institutionnels du LURE avec d'autres instituts de recherche.

En 1999, la part des pays étrangers dans les demandes d'accès s'est élevée à 24,4 % des demandes totales et les durées accordées ont représenté 21,6 % du total (voir figure suivante).

Figure 14 : Part des laboratoires étrangers dans le temps machine du



LURE

Par ailleurs, le LURE est engagé dans des coopérations à long terme avec un ensemble de pays, sur l'exploitation de lignes de lumière.

En premier lieu, deux lignes de photoémission-photodiffraction sur onduleur de l'anneau Super-ACO pour l'étude des surfaces sont exploitées dans le cadre de coopérations internationales. L'une se déroule avec plusieurs laboratoires suisses (Lausanne et Bâle) et l'autre avec l'ensemble de la communauté espagnole.

En second lieu, deux lignes de DCI pour les microfabrications donnent lieu à une collaboration étroite avec des centres de recherche allemands, l'IMM de Mayence d'une part, le centre de Karlsruhe d'autre part.

Les chercheurs du LURE, qui ont par ailleurs mis en place des collaborations bilatérales ou multilatérales dans différents domaines scientifiques, participent au moins à 23 contrats européens et à 8 contrats bilatéraux.

Le LURE bénéficie enfin depuis 1989 de contrats de l'Union européenne pour l'accès aux grandes installations, qui ouvrent ses installations aux autres chercheurs européens avec un financement correspondant à une redevance d'utilisation d'environ 4 millions de francs par an.

2. Le cas particulier du seul synchrotron international : l'ESRF de Grenoble

L'exemple de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) doit être examiné afin de déterminer dans quelles conditions et à quel niveau la coopération internationale est intervenue pour cette réalisation exemplaire.

L'ESRF est une société civile de droit français dont le financement est assuré par quinze pays. La part de la France est de 27,5 %, celle de l'Allemagne 25,5 %, celle de l'Italie 15 %, celle du Royaume Uni de 14 % et les parts de l'Espagne et de la Suisse toutes deux de 4 %.

Cette machine de 6 GeV possède un anneau de 844 m de circonférence, comprenant 32 sections droites dont 29 disponibles pour les dispositifs d'insertion. Sa construction a duré 11 ans, de 1988 à 1998, pour un coût total en francs courants de 2,2 milliards de francs, soit environ 6 milliards de francs 1999.

La dimension européenne de l'ESRF s'est imposée d'entrée, dans la mesure où il s'agissait d'un projet de grande dimension, devant repousser les limites technologiques des synchrotrons notamment en matière de production de rayons X "durs".

L'évolution technique a été telle, depuis lors, qu'il ne serait pas nécessaire aujourd'hui de construire une machine de la taille et du coût de l'ESRF pour obtenir des performances voisines.

Les succès techniques et scientifiques de l'ESRF sont incontestables. Alors que la construction de l'équipement est arrivée à son terme, ses capacités sont saturées, avec un taux de rejet des demandes d'accès important, comme on l'a vu. En outre, la coopération internationale a certes permis de financer un équipement d'un coût très élevé et sans doute de parvenir à des solutions techniques avancées pour leur époque. Aujourd'hui, elle semble introduire en sens inverse un encombrement des lignes de lumière par la multiplication des demandes et une certaine lourdeur de fonctionnement due au formalisme inévitable des procédures.

En tout état de cause, nombreux sont les observateurs qui, tout en saluant les performances exceptionnelles de l'ESRF, estiment qu'il est possible de faire aussi bien que ce synchrotron au niveau national, pour des coûts bien inférieurs, des performances égales et une souplesse de fonctionnement bien meilleure.

3. Une ambition pour la France : jouer le rôle de pivot pour l'accès au rayonnement synchrotron des Pays du sud de l'Europe, de la Méditerranée et de l'Est

Si l'Italie s'est récemment dotée d'un synchrotron de 3^{ème} génération, ELETTRA, dont les capacités sont d'ailleurs déjà saturées, la France semble en position de pouvoir mettre en place une coopération avec les autres pays du Sud de l'Europe à l'occasion de la construction d'un synchrotron national.

Un autre motif s'impose pour doter la France de ressources propres. Il s'agit de l'opportunité qu'il y a de favoriser l'accès de chercheurs de pays de la Méditerranée et des pays de l'Est, à des installations de pointe.

3.1. Une position à dynamiser en Europe du Sud

L'intérêt concret de l'Espagne pour la technologie des synchrotrons s'est déjà manifesté à plusieurs reprises, avec l'exploitation d'une ligne de lumière du LURE et une participation à l'ESRF.

L'Espagne semble à l'heure actuelle désireuse de passer à un niveau supérieur.

D'une part, un avant-projet de synchrotron national a été élaboré par l'université autonome de Barcelone avec le soutien du gouvernement d'Espagne et de celui de Catalogne. D'autre part, des réflexions sont en cours au sein de la Communauté de travail des Pyrénées pour développer une approche commune à la France et à l'Espagne.

Une coopération avec l'Espagne et le Portugal semble en tout état de cause à explorer plus en détail. La question de la localisation d'une machine en partenariat serait toutefois relativement épineuse, dans la mesure où l'implication de la ville de Barcelone semble étroite. Toutefois, le système de participation croisée apporterait une solution.

3.2. Un rôle à jouer pour les Pays du Sud de la Méditerranée et pour les Pays de l'Est

Le nouveau projet SESAME préparé sous les auspices de l'UNESCO consiste à créer un centre de recherche international au Proche Orient autour des installations du synchrotron BESSY I de Berlin offertes par l'Allemagne et transférées dans un lieu encore à déterminer de Palestine.

C'est la dimension de coopération scientifique autour des synchrotrons et de la pluridisciplinarité de leur apport qui sont encore une fois soulignées par un tel projet.

Une installation française pourrait, dans le même ordre d'idées, s'ouvrir largement aux chercheurs des pays du Maghreb.

Enfin, un synchrotron national dimensionné de façon ambitieuse pourrait également constituer le support d'une coopération scientifique accrue avec les pays de l'Est. Souvent excellemment formés, mais disposant d'équipements de recherche limités en nombre et en qualité, les chercheurs des pays de l'Est ont en outre vu se réduire leurs accès aux installations russes et ukrainiennes faute d'investissement de ces pays dans de nouvelles installations.

Supports d'échanges intellectuels entre chercheurs de plusieurs disciplines, les synchrotrons peuvent également servir de lieux d'une coopération scientifique de haut niveau et doivent être envisagés comme tels, dans des projets ambitieux et bénéfiques pour l'ensemble des parties.

II – LE BON NIVEAU D'UNE COOPÉRATION INTERNATIONALE : LES RECHERCHES SUR DE NOUVEAUX OUTILS DÉRIVÉS ET COMPLÉMENTAIRES DES SYNCHROTRONS ACTUELS

La technologie des synchrotrons de 3^{ème} génération offre encore de nombreuses possibilités de progrès, notamment pour les onduleurs, l'optique des lignes de lumière, l'instrumentation, les détecteurs et le traitement des données.

Une autre perspective s'ouvre actuellement, perspective qui, moyennant des investissements de recherche considérables, permettrait de nouveau de gagner plusieurs ordres de grandeur dans les performances des faisceaux d'ondes électromagnétiques.

Il s'agit des lasers à électrons libres, qui ne se substitueraient pas aux actuels synchrotrons de 3^{ème} génération, mais apporteraient de nouvelles possibilités.

1. Les perspectives des lasers à électrons libres, complément aux synchrotrons

Les lasers à électrons libres constituent de l'aveu des spécialistes, une voie d'avenir pour continuer à progresser dans le domaine du rayonnement synchrotron.

En 1997, le rapport Birgeneau estimait que la quatrième génération de sources de rayons X, après les anneaux de stockage, serait fondée sur les lasers à électrons libres : *" si elle rencontre le succès, cette technologie pourrait conduire à des progrès en brillance de plusieurs ordres de grandeur. C'est notre conviction qu'une recherche exploratoire doit être conduite sur cette quatrième génération de sources de rayons X et la plus haute priorité doit lui être donnée "*.

Le principe des lasers à électrons libres est de faire produire par des paquets d'électrons de forte densité un rayonnement de la plus faible longueur d'onde et de la plus forte brillance possible.

Sur un plan technologique, après les tubes à rayons X, sont apparus les synchrotrons de 2^{ème} génération produisant un rayonnement à partir des aimants de courbures. Puis les *" wigglers "* et les onduleurs ont été mis au point permettant d'atteindre, sur les synchrotrons de 3^{ème} génération, des brillances supérieures d'un facteur dix milliards de fois à celle des premiers faisceaux de synchrotrons de 2^{ème} génération.

L'objectif avec les lasers à électrons libres est de gagner un facteur 1000 par rapport aux meilleurs onduleurs de l'ESRF, par exemple. Ainsi, serait respectée la loi selon laquelle *" le rayonnement synchrotron gagne en brillance trois ordres de grandeur tous les dix ans "*.

Le principe des lasers à électrons libres est de faire évoluer un faisceau d'électrons de sorte qu'un effet d'auto-amplification du rayonnement électromagnétique émis par les électrons se déclenche spontanément.

Dans le domaine de lasers à électrons libres, toute la difficulté est d'une part de produire le phénomène d'amplification de l'émission d'ondes électromagnétiques et d'autre part d'obtenir cet effet pour les longueurs d'onde les plus faibles possibles.

Deux technologies sont envisageables à cet égard, la première défrichée en France au LURE et la deuxième au HASYLAB.

La première voie consiste à initier des interférences dans le faisceau placé dans un champ magnétique intense. Les paquets d'électrons utilisés sont peu denses mais sont placés dans un résonateur optique et soumis à un champ magnétique intense. L'idée est de créer des champs de force suffisant pour avoir une amplification spontanée. Le principe des cavités optiques résonantes est celui retenu par les chercheurs du LURE. En tout état de cause, il a été montré que le laser à électrons libres de Super-ACO pouvait être utilisé pour le domaine des ultraviolets.

L'autre voie, retenue au HASYLAB consiste à placer le faisceau dans un onduleur de grande longueur. Dans ce cas, l'on cherche à obtenir des paquets d'électrons d'une grande densité. Il suffit alors d'appliquer un champ magnétique relativement peu élevé pour déclencher l'effet SASE.

L'expérience réussie le 23 février 2000 sur l'installation TTF-FEL du HASYLAB a permis de mettre en évidence l'effet d'amplification recherché, pour une longueur d'onde de 109 nm (1090 Å). Les expérimentateurs de TTF-FEL ont constaté en effet, ce jour là pour la première fois, un gain en brillance d'un facteur 200, avec une contraction d'un facteur 10 de la distribution de longueur d'onde.

En toute hypothèse, en raison de leur brillance très élevée, les lasers à électrons libres ne sauraient se substituer aux synchrotrons de 3^{ème} génération. Mais il s'agit d'un champ de recherche fondamental dont la France ne saurait se passer et pour lequel il lui faut impérativement disposer d'un synchrotron national sur lequel des recherches de pointe entraînant des modifications des installations seront possibles, ce qui ne saurait être le cas sur une machine internationale.

2. La coopération internationale pour des " projets à risque " visant des sauts technologiques

La construction d'un synchrotron de 3^{ème} génération de haute énergie comme celle de l'ESRF, fut en son temps l'objet d'une coopération internationale. L'expérience a montré que cette approche était légitime et fut un succès. Les caractéristiques de l'ESRF lorsqu'elles ont été décidées, excédaient en effet largement les capacités financières et technologiques d'un seul pays européen.

Aujourd'hui la construction d'un synchrotron de 3^{ème} génération fait appel à des technologies maîtrisées et à des investissements pour lesquels la dimension nationale semble pouvoir être non seulement suffisante mais synonyme d'une plus grande efficacité.

Les installations internationales sont en effet lourdes à faire évoluer, en raison du rôle dévolu à des commissions multiples en matière de processus de décision, que ce soit pour des travaux sur les installations ou pour régler l'accès aux installations, par la sélection des projets effectuée par des comités de programme.

Au contraire, le vrai niveau d'une coopération internationale semble rester celui de la mise au point de nouveaux très grands instruments recourant à des technologies en émergence.

A cet égard, deux variables semblent intervenir pour déterminer l'intérêt éventuel d'une coopération internationale. Il s'agit d'une part, comme on l'a vu, de la difficulté de maîtrise des technologies et d'autre part du coût de l'installation par utilisateur. Le schéma ci-après présente l'idée selon laquelle deux zones optimales existent probablement en fonction de ces deux critères.

Figure 15 : Les domaines privilégiés de la coopération internationale

Lorsque le coût par utilisateur est peu élevé et que les technologies mises en œuvre sont maîtrisées au plan national, la coopération internationale s'impose moins que dans le cas contraire.

Il semble fondé d'appliquer cette grille de lecture au cas des synchrotrons, aujourd'hui des machines relativement banalisées desservant des communautés très larges d'utilisateurs, pour des coûts unitaires relativement peu élevés.

Si la coopération internationale ne semble pas désormais obligatoire pour des synchrotrons de 3^{ème} génération une fois ceux-ci mis au point, en revanche la coopération internationale pourrait trouver un point d'application privilégié dans la recherche sur les machines complémentaires dites "*lasers à électrons libres*", pour lesquels les investissements à engager et les difficultés techniques sont considérables.

A cet égard, il faut noter que la France est déjà active dans le domaine des accélérateurs linéaires de grande énergie et dans celui des lasers à électrons libres. Des coopérations existent d'ores et déjà entre la France et l'Allemagne, à la plus grande satisfaction des deux communautés scientifiques.

Se fondant sur le principe réaliste qu'une coopération ne se décrète pas mais se développe d'abord au niveau scientifique, avant d'être solennisée et amplifiée au niveau politique, il semble que certains responsables allemands soient demandeurs d'un accroissement des interactions avec la France tant pour les projets de laser à électrons libres que pour le projet de collisionneur linéaire TESLA.

Nul doute que le concours de la France est aujourd'hui recherché en raison des compétences de ses chercheurs. Il ne le serait plus si ces compétences disparaissaient, ce qui ne manquerait pas de se produire

rapidement s'ils ne pouvaient disposer d'un nouveau synchrotron national, d'une technologie avancée et polyvalent.

III – LE PROJET ANGLO-FRANÇAIS POUR UN DOMAINE SPÉCIFIQUE COMPLÉTÉ PAR D'AUTRES ACCÈS EN EUROPE, UN PLAN D'UN COÛT PROBABLEMENT SUPÉRIEUR À CELUI DE SOLEIL

Le projet du ministère de la recherche pour doter la France de ressources nouvelles en rayonnement synchrotron a été exposé à plusieurs reprises à vos Rapporteurs, d'abord le 19 janvier 2000 par M. René PELLAT, Haut commissaire à l'énergie atomique chargé d'animer le groupe de travail responsable des négociations avec le Royaume Uni sur le projet DIAMOND, puis les 21 et 22 février par des responsables de la partie anglaise, à Daresbury, Londres et Didcot, et enfin, le 1^{er} mars 2000, par M. Vincent COURTILLOT, Directeur de la recherche.

En outre, le groupe de travail, au fur et à mesure de ses travaux, a été alimenté en informations diverses sur l'évolution de la négociation, voire sur celle des conceptions françaises.

L'hypothèse de base adoptée par vos Rapporteurs, à l'instar du ministère, est qu'une amplification de la coopération internationale, dont on a vu qu'elle existe déjà dans le domaine des synchrotrons, est intéressante en soi.

Il convient toutefois de vérifier d'une part la cohérence interne du plan exposé par le ministère et donc la compatibilité des solutions explorées avec les objectifs posés a priori, et, d'autre part, l'adéquation de la solution d'ensemble aux besoins de la communauté scientifique non seulement française mais européenne.

1. Le coût du projet anglo-français et des lignes de lumière complémentaires, comparés à ceux de SOLEIL

Le plan des pouvoirs publics, en matière de rayonnement synchrotron, tel qu'il a été exposé à vos Rapporteurs à deux reprises, comporte trois "tranches", selon le tableau ci-après.

La première tranche devrait permettre de fournir à la communauté française l'équivalent de la moitié de capacité de SOLEIL, au moyen d'une participation au synchrotron DIAMOND. Cette machine d'une énergie de 3 à 3,5 GeV est conçue pour répondre en priorité aux besoins de la biologie structurale.

Comme le communiqué du 2 août 1992 du ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie, l'a indiqué, " *le Gouvernement français a décidé de coopérer avec le gouvernement de Grande-Bretagne et le Wellcome Trust (fondation de mécénat scientifique) pour la construction d'un synchrotron de 3^{ème} génération* ".

Selon les indications données à vos Rapporteurs, la participation de la France, qui devait initialement se limiter à 1/3 de la machine, serait depuis lors réévaluée à la hausse jusqu'à pouvoir fournir l'équivalent de 50 % de la capacité de SOLEIL.

Tableau 9 : Estimation des principales caractéristiques du plan des pouvoirs publics dans le domaine du rayonnement synchrotron

	caractéristiques	délais	pourcentage de la capacité de SOLEIL
1 ^{ère} tranche	négociation d'une participation française au projet DIAMOND	- accord sous quelques mois - délai de signature officielle de l'accord et de mise au point de l'APD DIAMOND : 12 à 18 mois	- 50 %
2 ^{ème} tranche	location de lignes en Suisse et en Allemagne	- discussions en cours - disponibilité sous quelques mois des lignes de lumière	- 10 à 25 %
3 ^{ème} tranche	- location de lignes supplémentaires ou - construction	- inconnus - subventions européennes éventuelles liées à l'entrée	environ 25 %

	d'une machine en France dans le cadre d'une coopération européenne	en vigueur du VIème PCRD en 2002	
--	--	----------------------------------	--

La deuxième tranche correspond à la location complémentaire de lignes de lumière en Allemagne et en Suisse.

La troisième tranche correspond soit à la location de lignes supplémentaires sur d'autres machines situées en Europe, soit à la construction en coopération européenne d'une machine supplémentaire, éventuellement sur le sol national.

1.1. Le coût des lignes sur DIAMOND

Devant les polémiques existant sur le coût vraisemblable de la solution d'achat de lignes de lumière sur une machine anglo-française DIAMOND, vos Rapporteurs ont demandé à M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF et aux experts du LURE, d'établir leur propre évaluation.

En outre, il est nécessaire d'aborder la question au fond du retard supposé de la biologie française par rapport à la biologie britannique.

1.1.1. Le coût des lignes de lumière

En l'absence de données précises du fait de la négociation en cours, l'hypothèse adoptée pour ces calculs est que la France obtiendrait 7 lignes de lumière.

Cette hypothèse n'apparaît pas dénuée de fondement, dans la mesure où il a été indiqué à vos Rapporteurs, lors de leur déplacement à Manchester, Londres et Didcot, que DIAMOND devrait comprendre 20 lignes de lumière, dont 3 réservées au Wellcome Trust et 10 à 11 réservées aux chercheurs britanniques, ce qui n'en laisse que 7 à la disposition de la France.

Le tableau suivant présente les deux évaluations établies en conséquence.

Tableau 10 : Estimations du coût sur 8 ans de 7 lignes sur la machine anglo-française DIAMOND

calculs sur 8 ans, salaires inclus	calcul de M. Y. PETROFF	selon le LURE
7 lignes sur DIAMOND	<ul style="list-style-type: none"> - participation aux infrastructures et à la source : <li style="text-align: center;">350 MF - 7 lignes avec les têtes de lignes et les onduleurs : <li style="text-align: center;">140 MF - salaires pour le personnel de construction, de fonctionnement et de maintenance (8x60 MF/an) : <li style="text-align: center;">480 MF total : <li style="text-align: center;">970 MF 	<ul style="list-style-type: none"> - participation aux infrastructures et à la source : <li style="text-align: center;">350 MF - 7 lignes avec les têtes de lignes et les onduleurs : <li style="text-align: center;">100 MF - salaires pour le personnel de construction, de fonctionnement et de maintenance (8x60 MF/an) : <li style="text-align: center;">480 MF total : <li style="text-align: center;">930 MF

Dans l'hypothèse d'une participation à DIAMOND, le coût annuel par ligne de lumière serait de 17 millions de francs.

Ce coût est à mettre en parallèle avec le coût annuel par ligne sur un synchrotron de type SOLEIL implanté sur le territoire national, qui atteint 11 millions de francs.

En tout état de cause, tout se passe comme la prise de participation sur DIAMOND pour bénéficier de l'environnement britannique de qualité dans le domaine des sciences de la vie, entraînait un **surcoût de 55 %**, par rapport à une solution nationale.

Au cas où pour la même enveloppe, un nombre de lignes supérieur serait obtenu, le surcoût pourrait effectivement diminuer. Par exemple, avec 10 lignes, il serait égal à 10 %.

Ces évaluations confirment l'intuition de bon sens que l'exploitation d'une partie de machine située à l'étranger est toujours plus onéreuse que sur le sol national.

Au demeurant, cet élément est confirmé par le Professeur Jochen SCHNEIDER à propos de l'Institut Lauë-Langevin de Grenoble, dont l'exploitation d'une partie par l'Allemagne lui revient plus cher que si cette source de neutrons était implantée sur son sol.

Au reste, un autre sujet doit être abordé, celui du retard supposé ou allégué de la biologie structurale française par rapport à sa rivale britannique. Pour traiter d'un tel sujet, il est avant tout indispensable de se référer aux chiffres.

1.1.2. Les positions respectives de la biologie française et de la biologie britannique

Les Etats-Unis produisent à eux seuls 55 % des publications mondiales en biologie structurale. Le Royaume Uni produit 12 % du total, l'Allemagne 11 % et la France 7 %.

Le retard de la France sur le Royaume Uni a la même cause que celui du Royaume Uni sur les Etats-Unis. Il s'agit d'un effet de taille et non pas d'un effet qualitatif. L'écart entre ces différents pays provient avant tout du nombre d'équipes de chercheurs dans ce domaine et des financements accordés. Au demeurant, on peut même déduire de ces chiffres qu'une coopération avec l'Allemagne dans le domaine de la biologie structurale présenterait le même avantage que celui résultant d'une coopération anglo-française.

En outre, l'examen des publications dans ce domaine montre que la France a plus innové dans le domaine de l'utilisation du rayonnement synchrotron en biologie que le Royaume Uni.

1.2. Le coût des lignes de lumière d'appoint

En raison du fait que des négociations sont également en cours pour des accès permanents à des lignes de lumière en Allemagne et en Suisse, vos Rapporteurs n'ont pas eu accès à des informations sur les coûts correspondants.

Mais, dans l'hypothèse vraisemblable où il s'agirait de créer des lignes de lumière correspondant avec précision aux besoins des chercheurs français, on peut imaginer que les coûts des équipements des lignes

incombent à la France, y compris celui des onduleurs et des têtes de lignes.

Il serait donc surprenant que l'Allemagne et la Suisse octroient des lignes de lumière à la France à des coûts significativement différents de ceux obtenus au Royaume Uni.

1.3. Les coûts de redéploiement ou de fermeture du LURE

Le schéma d'un partenariat avec le Royaume Uni et de la location de lignes d'appoint en Europe porte en soi une menace sur l'avenir du LURE. Certes le communiqué du 2 août 1999 précité, indiquait que "*la poursuite du LURE à Orsay n'est pas remise en cause*".

Toutefois, cette éventualité doit être intégrée au coût de la solution de délocalisation de nos ressources en rayonnement synchrotron. En combinant le chiffrage habituel du coût de fermeture d'un établissement industriel et l'évaluation des conséquences d'un non-transfert des personnels du LURE vers SOLEIL, le coût de fermeture du LURE ressort à 5 ou 6 années de fonctionnement, ce qui conduit à un montant de l'ordre de 500 millions de francs.

Dans les différentes évaluations produites sur les coûts comparés de la solution française et de la solution britannique, les coûts de fermeture du LURE ne sont curieusement pas pris en compte, ce qui paraît inacceptable.

Ainsi que l'a exposé M. Jean-Claude LEHMANN, la situation actuelle de la communauté française du rayonnement synchrotron porte en elles les germes d'une "*catastrophe humaine*".

Le LURE comprend en effet des chercheurs de haut niveau dont les centres de rayonnement synchrotron étrangers aimeraient sans aucun doute s'attacher les services. Si une décision positive n'était pas rapidement prise en faveur d'une source nationale de rayonnement synchrotron, on pourrait s'attendre que les équipes se dispersent rapidement, ruinant les chances de la France d'être présente dans ce domaine pour de très longues années.

1.4. Un effort national permettant de disposer d'un potentiel supérieur à long terme

La comparaison a été faite par plusieurs experts des sommes dépensées sur 8 ans dans le cadre d'un projet national ou un projet

consistant à prendre une participation sur une machine anglo-française et à louer des lignes sur d'autres installations.

Il n'est pas surprenant de constater que toutes les évaluations convergent pour démontrer qu'au terme d'une période de 8 années, la solution nationale présente l'avantage, d'une part, d'avoir construit un patrimoine de lignes disponibles supérieur à celui de toute autre solution, et, d'autre part, d'avoir posé les bases d'un développement ultérieur de lignes complémentaires qui pourraient être construites à moindre coût.

En l'occurrence, dans une technologie clé comme le rayonnement synchrotron, il serait dommageable pour la France d'adopter une vision de court terme, réduisant probablement de très peu les dépenses faites, et compromettant d'une manière certaine le potentiel à long terme de la recherche française.

2. Des capacités insuffisantes pour la France et l'Europe

Si la solution du recours à des lignes "*externalisées*" semble relativement coûteuse, elle ne semble pas en outre contribuer à faire avancer l'Europe de la manière souhaitable dans le domaine du rayonnement synchrotron.

Le retard de l'Europe sur les Etats-Unis en matière de rayonnement synchrotron, une question au demeurant discutée, peut s'évaluer de deux façons, la première au regard des besoins d'une discipline phare comme la biologie structurale, et la deuxième au regard du nombre de lignes de lumière disponibles.

Dans un premier temps, il est utile d'examiner le domaine de pointe que constitue la biologie structurale et de mesurer l'utilisation respective du rayonnement synchrotron pour la résolution de structures, puisque cette technique est considérée par tous les spécialistes comme la technique de pointe dans ce domaine.

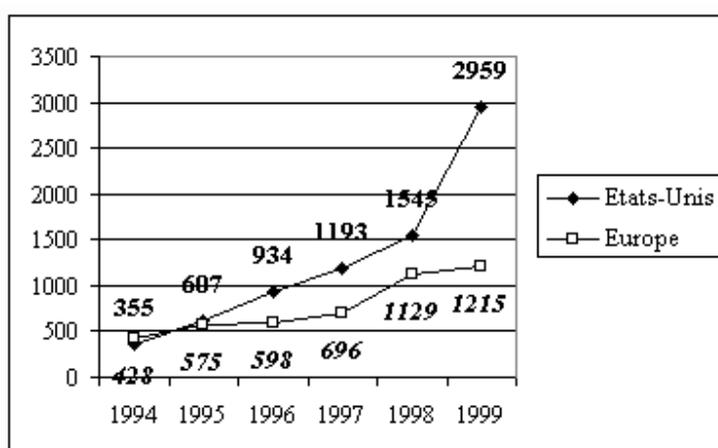
Les statistiques établies par le Hasylab et l'EMBL (European Molecular Biology Laboratory) de Hambourg mettent en évidence que le nombre de publications de biologie structurale résultant de travaux effectués sur des synchrotrons est 2,4 fois plus élevé aux Etats-Unis qu'en Europe (voir figure suivante).

Bien évidemment, ce décalage pourrait provenir d'une productivité insuffisante des synchrotrons européens ou d'un positionnement technique défavorable aux études structurales.

Il paraît plus vraisemblable d'attribuer ce décalage à une pénétration inférieure des techniques du rayonnement synchrotron dans l'industrie pharmaceutique européenne. Dans ces conditions, on peut prévoir un rattrapage de l'Europe dans les années à venir, qui fera considérablement augmenter les besoins d'accès aux lignes de lumière des machines européennes.

Figure 16 : Nombre de publications en biologie structurale résultant de travaux conduits sur les synchrotrons américains ou européens

source : HASYLAB –DESY Hambourg



Par ailleurs, le recensement des postes expérimentaux disponibles en Europe et aux Etats-Unis, effectué par M. Yves FARGE, montre un retard européen actuel de 11 % pour les synchrotrons de 2^{ème} génération (voir tableau suivant).

Tableau 11 : Expériences disponibles en Europe et aux Etats-Unis sur des synchrotrons de 2^{ème} génération

synchrotrons de 2 ^{ème} génération	énergie (GeV)	nombre d'expériences
I – Europe		
Lure DCI	0,8	43
Super-ACO	1,85	
SRS (Daresbury, RU)	2,0	38

DORIS III (Hasylab, Hambourg, Allemagne)	4,45	41
Bessy I (Berlin, Allemagne)	0,8	35
Max I (Lund, Suède)	0,5	7
Astrid (Danemark)	0,58	4
Anka (Karlsruhe, Allemagne)	2,5	12 (en construction)
TOTAL		168
II - Etats-Unis		
Surf II	0,4	8
SSRL	3,0	31
NLS	0,8	95
	2,5	
Chess	4,0	12
Aladin	0,8	27
CAMD		14
TOTAL		187

La question qu'il est nécessaire de se poser est donc la suivante : compte tenu du rattrapage qui va devoir s'exercer pour la seule biologie moléculaire, les projets en cours sont-ils suffisants ?

Certes, à l'heure actuelle, l'Europe possède une avance de 16 % pour les synchrotrons de 3^{ème} génération (voir tableau suivant). Mais cette avance sera-t-elle suffisante ?

Avec la construction de DIAMOND, l'Europe devrait passer sous 10 ans à 198 postes expérimentaux tout en perdant les 81 postes du LURE et de SRS.

On ne peut exclure que les Etats-Unis ne décident pas la construction d'une nouvelle machine ou n'aillent au-delà de la modernisation des sources NSLS et SSRL, deux sources de 2^{ème} génération actuellement reconstruites pour se rapprocher des performances des sources de 3^{ème} génération.

Tableau 12 : Postes expérimentaux disponibles, en construction ou en projet en Europe et aux Etats-Unis sur des synchrotrons de 3^{ème} génération

synchrotrons de 3 ^{ème} génération	énergie (GeV)	nb d'expériences en fonctionnement	nb d'expériences en construction ou en projet	total potentiel
I – Europe				
ESRF (Grenoble, France)	6,0	38	12	50
ELETTRA (Trieste, Italie)	1,9	16	14	30
MAX II (Lund, Suède)	1,5	7	5	12
Bessy II (Berlin, Allemagne)	1,9	12	24	36
SLS (Villigen, Suisse)	2,4		30	30
DIAMOND (Didcot ou Daresbury, Royaume Uni)	3-3,5		40 (projet)	40 (projet)
TOTAL		73	sous 3	sous 3

			ans : 85	ans : 158
			sous 10 ans : 125	sous 10 ans : 198
II – Etats-Unis				
ALS	1,9	27	11	38
APS	7	34	36	70
NSLS et SSRL			30	30
TOTAL		61	sous 3 ans : 77 sous 10 ans : ?	sous 3 ans : 138 sous 10 ans : ?

Il est donc possible de dire que l'avance dont dispose l'Europe sur le papier, est d'une part susceptible de se réduire et d'autre part potentiellement annihilée par le processus de rattrapage que l'on peut prévoir en matière d'utilisation des lignes de lumière par la seule biologie structurale.

Au-delà de ces considérations, le seul constat des constructions en cours et même l'analyse des projets ne sauraient suffire à donner une appréciation correcte de la situation.

En effet, une course de vitesse est en effet engagée dans l'ensemble des disciplines scientifiques pour l'application du rayonnement synchrotron et en particulier pour la résolution des structures des protéines, course de vitesse dans laquelle il est vital d'anticiper les réactions des autres compétiteurs.

Pour de nombreux experts, le post génome sera l'âge d'or de la génomique structurale. La connaissance de la structure des protéines est un enjeu scientifique capital pour au moins deux raisons. La première est que la structure des protéines est liée à leur fonction. La connaissance de la structure de ces micro machines peut permettre d'en bloquer ou d'en modifier le fonctionnement. La deuxième raison est que la connaissance des protéines permet d'explorer les mécanismes de codage mis en œuvre par le génome.

Comme l'a exposé M. Vincent MIKOL, directeur de recherche chez Aventis, le processus de développement d'une molécule active, c'est-à-dire d'un médicament, commence avec l'identification du constituant de la cellule qui est responsable de la maladie considérée. En moyenne, la dépense de recherche et développement correspondant à la mise sur le marché d'un nouveau médicament s'élève à 400 millions d'euros.

Or deux évolutions fondamentales bouleversent ce processus de développement. La première est d'ordre juridique, avec la brevetabilité du vivant. La seconde est d'ordre scientifique, avec le décryptage du génome, qui permettra de faire le lien entre un ou plusieurs gènes particuliers et une maladie spécifique

La Directive 98/44/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 juillet 1998 relative à la protection juridique des inventions biotechnologiques dispose dans son article 5 que :

" 1. Le corps humain, aux différents stades de sa constitution et de son développement, ainsi que la simple découverte d'un de ses éléments, y compris la séquence ou la séquence partielle d'un gène, ne peuvent constituer des inventions brevetables.

" 2. Un élément isolé du corps humain ou autrement produit par un procédé technique, y compris la séquence ou la séquence partielle d'un gène, peut constituer une invention brevetable, même si la structure de cet élément est identique à celle d'un élément naturel.

" 3. L'application industrielle d'une séquence ou d'une séquence partielle d'un gène doit être concrètement exposée dans la demande d'un brevet. "

Pour M. Vincent MIKOL, les enjeux sont désormais clairement posés. La brevetabilité du vivant est courante aux Etats-Unis.

Au reste, les pays membres de l'Union européenne ont l'obligation de transposer cette directive avant le 30 juillet 2000. Il ne fait aucun doute pour les entreprises privées que la brevetabilité des gènes sera la règle dès cette année et qu'elle les oblige à se lancer sans délai dans la course.

Ainsi donc, selon la directive n° 98/44/CE, un gène sera brevetable si l'on peut prouver qu'une utilisation industrielle de ses propriétés est possible. Comment administrer cette preuve ? En mettant en évidence une fonction exercée par ce gène. La brevetabilité du gène s'exercera sur la fonction démontrée et non pas sur l'ensemble de ses fonctions, qui peuvent être multiples et liées à d'autres gènes.

L'identification d'un gène et de sa fonction s'opère principalement par le criblage d'un grand nombre de molécules.

Les protéines revêtent un intérêt central, à cet égard, en tant que macromolécules intervenant dans tous les processus biologiques. Agents essentiels de la structure et du fonctionnement des cellules, les protéines participent aussi à la synthèse de l'ADN et au contrôle de l'information génétique nécessaire pour la formation d'ARN et d'autres protéines.

L'objet de nombreuses études est donc l'identification de la structure de protéines, suivie de la sélection des molécules qui, leur étant greffées, peuvent bloquer leur fonctionnement. C'est là qu'intervient le rayonnement synchrotron, dont c'est l'utilisation principale pour Aventis, au titre de "*l'optimisation des pistes pour des têtes de série chimiques*".

La course de vitesse entre les laboratoires pharmaceutiques est donc encore accélérée par ces nouvelles perspectives juridiques.

Il semble donc que l'Europe et la France aient à investir sans aucun délai dans la construction de nouvelles ressources en rayonnement synchrotron, les installations les plus performantes étant d'ores et déjà saturées.

Le non-remplacement des installations de Daresbury et d'Orsay mettrait l'Europe en difficulté.

A cet égard, la priorité semble devoir être donnée à la vitesse de réalisation d'un nouvel équipement pour aider différentes disciplines à monter en puissance, et en particulier la biologie structurale.

On peut aussi se demander s'il ne conviendrait pas d'adopter une politique dynamique d'augmentation des ressources françaises en rayonnement synchrotron, qui seule permettrait d'anticiper sur les réactions des autres pays.

Conclusion

Les Etats-Unis ont clairement énoncé dans le rapport Birgeneau que l'enjeu des synchrotrons est d'une importance globale pour la compétitivité de leur recherche et de leur industrie.

Dans un tel contexte et alors que les synchrotrons apparaissent comme des machines banalisées au service de vastes communautés de chercheurs, la coopération européenne pourrait être optimale si elle se déroulait dans un cadre de subsidiarité.

On peut souhaiter à cet égard que la politique communautaire dans le domaine de la recherche se mette clairement au service des dynamiques des différents pays membres de l'Union en contribuant au financement d'initiatives nationales et favorise la coopération multilatérale là elle est nécessaire, c'est-à-dire dans le domaine des équipements complémentaires que constitueront les lasers à électrons libres.

En tout état de cause, le recours exclusif à la coopération internationale pour satisfaire les besoins nationaux apparaîtrait quelque peu paradoxal, alors que la France se trouve dotée de ressources compétitives et que la notion de concurrence scientifique est plus que jamais présente dans les stratégies de tous les pays développés.

- CHAPITRE III – UN NOUVEAU SYNCHROTRON NATIONAL DANS UN CADRE RÉNOVÉ, UN IMPÉRATIF POUR LA DYNAMIQUE SCIENTIFIQUE, ÉDUCATIVE ET INDUSTRIELLE DE NOTRE PAYS

Introduction

Les critiques explicites des pouvoirs publics contre l'avant projet détaillé de nouveau synchrotron français SOLEIL, telles qu'elles apparaissent début mars 2000, tiennent en quatre points.

Le premier point est que la communauté scientifique n'a pas su présenter un dossier global relatif à l'ensemble des grands outils d'analyse fine de la matière, ce qui expose le Gouvernement à devoir faire face aux demandes successives de communautés diverses sans disposer de priorités clairement établies.

Le deuxième point est une prise en compte insuffisante des " *champs scientifiques* " couverts par les synchrotrons et dont l'intérêt n'a pas été suffisamment établi.

Le troisième point est un faible engagement de l'industrie dans le projet et l'absence de volonté de sa part de s'y engager à terme.

Le quatrième point est qu'au moins, la réflexion préalable sur le nouveau synchrotron aurait dû se placer au niveau européen, quitte à ne pas déboucher sur une solution européenne, comme le principe en avait été posé par le Gouvernement dès 1997.

Intervenant, comme le Bureau de l'Assemblée nationale le leur a demandé, dans la crise de confiance survenue dans la communauté scientifique française des synchrotrons et de leurs utilisateurs, vos Rapporteurs ont analysé à leur tour la situation au regard de plusieurs critères, dont les quatre critères implicitement visés plus haut.

Comme on l'a vu précédemment, l'intérêt scientifique du rayonnement synchrotron est aujourd'hui prouvé. Il s'agit de l'outil d'analyse de la matière le plus performant et le plus diversifié, dont la contribution au progrès et aux découvertes scientifiques est démontrée par de

nombreux indicateurs – publications scientifiques, applications industrielles, brevets -.

Par ailleurs, la nécessité d'une coopération européenne ou à tout le moins d'une coordination européenne n'est aujourd'hui contestée par personne. On peut même souhaiter qu'émerge dans l'Union européenne une politique d'impulsion et de financement analogue, dans le domaine des synchrotrons, à celle appliquée aux Etats-Unis par le Département de l'énergie (D.O.E.) au niveau fédéral, qui gère en direct quatre synchrotrons et en finance d'autres.

Mais, au-delà de ces nécessités incontestables, il reste la question de la maîtrise des dépenses relatives aux très grands équipements.

A cet égard, on ne peut que regretter qu'une planification globale des équipements de la recherche ne soit pas assurée en France et que depuis la mise en sommeil – suivie d'une dissolution – du Comité des très grands équipements, aucun organisme ne soit venu le remplacer, ce qui a créé un vide préjudiciable aux équilibres de la recherche française.

Mais, cette question dépasse de loin la question du synchrotron, qui, comme on l'a vu, ne ressortit pas, au fond des choses, de la catégorie des très grands équipements.

L'on ne saurait en effet appliquer au synchrotron – un grand instrument interdisciplinaire et partagé -, le même raisonnement qu'aux autres très grands équipements qui sont, eux, spécialisés et exclusifs.

En définitive, la question d'un synchrotron national ne saurait être éliminée au regard des critiques posées par les pouvoirs publics à l'encontre du projet SOLEIL et dont certaines ne le concernent pas.

Au contraire, il s'agit aujourd'hui, sur la base des analyses précédemment développées, de déterminer les caractéristiques générales d'un nouveau centre national de rayonnement synchrotron et de poser les bases d'une initiative concrète et immédiate, indispensable pour la dynamique scientifique, éducative et industrielle de notre pays.

I – DES COMPÉTENCES FRANÇAISES DE NIVEAU MONDIAL PRÉCIEUSES POUR L'AVENIR SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIEL DE NOTRE PAYS

La qualité des bases éducatives et scientifiques d'un pays est un critère essentiel dans les choix de localisation que font les entreprises pour leurs établissements, et au premier chef pour leurs laboratoires de recherche.

Cet impératif pour la France de consolider ces bases mais aussi de les développer a été souligné par tous les interlocuteurs de vos Rapporteurs, qu'ils soient industriels des biens intermédiaires, industriels des biens d'équipement ou de la pharmacie et des biotechnologies.

Or la France dispose de compétences mondiales dans le domaine des synchrotrons. Il n'est que de voir la place du LURE dans la mise au point de la 3^{ème} génération de synchrotrons, dans la réalisation de l'ESRF et dans la préparation de l'avant-projet SOLEIL dont la qualité technique est saluée par tous les pays.

Il n'est que de voir l'importance qu'attache l'Allemagne, un partenaire de plusieurs années de coopération dans les accélérateurs et les synchrotrons, à voir la France reprendre, dans le peloton de tête de la compétition mondiale du rayonnement synchrotron, la place qu'elle est sur le point de perdre après plusieurs années d'atermoiements sur l'indispensable renouvellement des synchrotrons DCI et Super-ACO.

1. La nécessité de points d'ancrage pour des laboratoires de recherche de plus en plus mobiles

Ainsi que l'a signalé avec force M. Jean-Claude LEHMANN, directeur de la recherche du Groupe Saint Gobain, ce que les entreprises internationales françaises attendent aujourd'hui de leur pays d'origine, c'est essentiellement un "*apport intellectuel de formation et de recherche*", qui les incite à garder leur culture d'origine.

En outre, une entreprise comme Saint Gobain a le souci de garder, pour des raisons de confidentialité, la recherche relative à son cœur de métier sur le sol national. Pour autant, les entreprises examinent quels sont les moyens de recherche publique qui sont les meilleurs et les plus accessibles dans les différents pays.

Le contexte général, fiscal et social joue également dans le choix d'implantation. La France qui présente une fiscalité et des coûts sociaux

plus élevés que certains autres pays de développement comparable, doit donc s'attacher à avoir les meilleurs atouts dans le domaine de la recherche.

2. Les compétences françaises dans le domaine des synchrotrons, pivots d'une activité et d'une coopération internationale fructueuse

Il convient de rappeler une évidence en matière de coopération, à savoir que pour figurer dans un réseau international d'échanges de connaissances et de compétences, il faut avoir soi-même quelque chose à échanger.

Vos Rapporteurs ont eux-mêmes constaté au Royaume Uni que l'offre de la France de s'associer au projet DIAMOND était considérée favorablement grâce à sa double dimension financière, d'une part, permettant de diminuer les coûts à la charge tant du Gouvernement anglais que du Wellcome Trust, et technique, d'autre part, certains membres de la communauté française des synchrotrons étant prêts à mettre leurs compétences reconnues au niveau mondial au service de ce nouveau projet dont les chercheurs britanniques bénéficieront au premier chef.

Dans un autre ordre d'idées, vos Rapporteurs ont retiré de leur visite du Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) de Hambourg où se trouvent les deux synchrotrons PETRA II et DORIS III du Hasylab, la certitude que la coopération avec la France est considérée comme cruciale, en particulier pour les travaux sur les lasers à électrons libres, dans la mesure où différents matériels implantés à DESY ont été conçus et fabriqués au CNRS et au CEA et où la France détient un savoir-faire important dans le domaine des lasers à électrons libres acquis par le LURE à Orsay.

En l'occurrence, il est absolument vital que la France garde un statut de partenaire et ne glisse pas vers celui de simple client des principaux synchrotrons étrangers.

A cet égard, l'existence d'un synchrotron national est d'une importance cruciale.

Il y va de sa maîtrise future de techniques aussi fondamentales pour l'étude fine de la matière que la diffraction-diffusion, la diffusion sous faibles angles, la diffusion inélastique, l'absorption, la fluorescence, l'analyse des surfaces, les techniques d'imagerie, toutes techniques utilisées dans l'ensemble des disciplines scientifiques.

II – LA NÉCESSITÉ D'UN SYNCHROTRON POLYVALENT, PLURIDISCIPLINAIRE ET ÉVOLUTIF

1. La nécessité d'une machine nationale et les critères externes de choix de ses caractéristiques

1.1. La proximité et l'accessibilité aisée, deux conditions essentielles pour l'utilisation du rayonnement synchrotron

Un synchrotron multinational comme l'ESRF constitue sans aucun doute une machine de choix, au sommet des performances dans certains domaines. C'est d'ailleurs essentiellement parce qu'il s'agissait de repousser les limites technologiques de l'époque qu'une coopération multilatérale s'est nouée avec succès pour sa construction.

Toutefois, une machine internationale présente les inconvénients de ses avantages. En premier lieu, le succès de l'ESRF multiplie les demandes d'accès à ses lignes de lumière, entraînant une sélectivité de plus en plus poussée de la part du comité de programmes qui examine les projets de recherche déclarant nécessiter un accès à la machine.

Par ailleurs, construit et exploité sur des bases multinationales, la part d'un pays dans l'investissement de départ et dans les frais de fonctionnement se traduit par un quota de fait dans les temps d'accès au synchrotron, même si une certaine marge de dépassement est autorisée en fonction de la qualité des projets.

Par ailleurs, les procédures d'accès qui impliquent nécessairement l'ensemble des pays partenaires, présentent une certaine lourdeur dans l'instruction des demandes, ce qui amplifie les délais d'accès aux lignes de lumière.

1.2. Une machine indispensable pour des expériences préliminaires ou aléatoires et pour des contrôles intermédiaires

Le caractère international d'un synchrotron comme l'ESRF et la pression de la demande poussent à rationaliser son exploitation.

On ne saurait passer sous silence le fait qu'il existe une sorte de compétition mondiale entre les synchrotrons de 3^{ème} génération de

haute énergie construits à la même époque, à savoir l'ESRF lui-même, le synchrotron APS aux Etats-Unis et la machine Spring-8 au Japon. Cette compétition est réglée à coup de publications dans les revues d'audience internationale, et la direction de l'ESRF a eu à coeur d'en relever le défi ces dernières années

En conséquence, un synchrotron du type de l'ESRF aura certes tendance à œuvrer dans des domaines de pointe mais aussi à sélectionner les projets qui maximiseront le potentiel de l'installation et pourront déboucher sur des résultats publiables dans des revues d'audience mondiale, au détriment des projets plus gourmands en temps de faisceau et au total plus aléatoires.

Un synchrotron national est donc indispensable d'une part pour faire les manipulations préliminaires à celles prévues sur une machine comme l'ESRF, par nature peu généreuse en temps machine du fait de l'encombrement de ses lignes et d'autre part, selon l'expression de M. Jacques FRIEDEL, pour "*décortiquer*" un problème difficile.

Elle est également déjà indispensable pour réaliser les contrôles intermédiaires qui s'imposent dans des expérimentations complexes et longues comme la cristallisation des protéines.

On sait que ce n'est pas l'état naturel d'une protéine que d'être cristallisée. Pour autant leur préparation sous cette forme est indispensable pour déterminer leur structure par diffraction de rayons X produits par un synchrotron.

Dans les cas les plus acrobatiques, il peut être capital de vérifier qu'un procédé conduit à des résultats satisfaisants. D'où l'intérêt de pouvoir faire très rapidement les manipulations de contrôle ou de "*screening*" que seules permettent des installations dont la gestion est souple et avec les responsables desquelles les relations sont étroites, fréquentes et confiantes.

1.3. Un synchrotron national indispensable pour participer aux recherches sur les méthodes d'analyse de la matière

Une autre exigence rend indispensable un synchrotron national : c'est celle de la participation à une démarche de progrès qui continuera encore de longues années dans le domaine des synchrotrons.

L'œuvre accumulée par la communauté française du rayonnement synchrotron, entendue comme rassemblant à la fois les concepteurs et

les utilisateurs, et les compétences acquises par ceux-ci méritent certainement que les moyens leur soient donnés, pour la compétitivité de la recherche française, de continuer à participer au premier rang à la compétition internationale sur les applications des rayonnements électromagnétiques produits par des synchrotrons.

A cet égard, l'on ne saurait trop insister sur le fait que des marges de progrès considérables existent encore sur les synchrotrons de 3^{ème} génération, sans parler de la nouvelle frontière constituée par les équipements complémentaires que constitueront selon toute probabilité les lasers à électrons libres.

Parce qu'au-delà des synchrotrons eux-mêmes, il s'agit aussi de disciplines à applications multiples sur les instruments de la physique, il convient que la France continue son travail sur l'optique des lignes de lumière et l'instrumentation, en particulier sur les détecteurs et l'informatique d'exploitation des données, sur lesquelles ses positions acquises sont d'ores et déjà considérables. La réussite dans ces domaines passe par la libre disposition d'une machine.

A cet égard, il faut citer l'exemple désastreux de la neutronique en Italie, signalé à vos Rapporteurs par M. Roger BALIAN, membre de l'Académie des sciences et confirmé par M. José TEIXEIRA, directeur adjoint du laboratoire Léon Brillouin (LLB) de Saclay.

L'école italienne de la physique neutronique a occupé l'une des premières places mondiales, jusqu'à ce que la fermeture du réacteur nucléaire dont elle disposait en Italie, la condamne à une mort lente que l'accès à des sources européennes comme l'Institut Laue-Langevin (ILL) de Grenoble ou le LLB de Saclay n'a pu que ralentir mais en aucun cas éviter.

Le statut de "*chercheur international*" passant sur une machine internationale pour compléter les expériences réalisées sur le sol national est certes celui que l'on rencontre aujourd'hui en particulier dans le domaine des synchrotrons.

Il ne saurait être confondu avec celui de "*chercheur errant*" d'une machine étrangère à une autre, au gré de créneaux de disponibilité toujours rares et âprement disputés.

2. L'énergie et les dimensions de la machine optimale

Parmi les controverses auxquelles vos Rapporteurs ont assisté pendant les trois mois de préparation de la présente étude, celle de l'énergie optimale d'un synchrotron est sans doute la plus aiguë.

Certes il n'est plus question aujourd'hui de rééditer la construction de synchrotrons d'énergie de 6 ou 7 GeV comme l'ESRF ou l'APS, mais, grâce aux progrès des onduleurs, d'obtenir des performances voisines de celles de ces derniers avec des énergies moitié moins élevées.

Pour autant, il est apparu un débat pour le moins vif, entre les tenants de la thèse d'un optimum existant actuellement dans la gamme 2,5-3,5 GeV et ceux de la thèse suivant laquelle le progrès déjà enregistré pourrait s'accélérer et conduire à des machines de 1,5 GeV quatre fois moins coûteuses et tout aussi performantes que les synchrotrons de 2,5 GeV dont la construction a été décidée récemment.

En réalité, il semble bien que la notion d'optimum d'énergie soit une notion recevable, résultant d'ailleurs d'un consensus international fondé sur l'expérience.

Il reste que la question est bien, à ce sujet, d'arbitrer entre l'urgence de satisfaire des besoins bien réels et l'intérêt d'attendre l'apparition improbable d'une rupture technologique dont l'application se ferait dans un champ de ruines.

2.1. La question de l'énergie de la machine

L'une des critiques implicites faites au projet SOLEIL est un flottement supposé dans le choix de son énergie. Celle-ci, en effet, a été réévaluée au fur et à mesure des travaux de définition de la future machine, passant de 2,1 GeV à la gamme de 2,5-2,75 GeV dans la version finale de l'avant-projet détaillé.

Or la fixation du niveau d'énergie ne saurait prendre l'aspect d'une question idéologique ou constituer un argument de négociation.

Le premier argument en faveur d'une énergie " basse ", c'est-à-dire inférieure à 2 GeV est qu'une physique importante et intéressante nécessite des faisceaux présentant ces caractéristiques. Si cette position est incontestable, deux de ses corollaires ne semblent pas exacts.

En premier lieu, il est vrai qu'en cas de nécessité, un tel synchrotron une fois construit peut être modifié de façon à délivrer, malgré son énergie insuffisante, des faisceaux de rayons X durs de qualité. Mais il

s'agit de modifications coûteuses, comme le montre l'exemple de la source ALS de Berkeley qui a subi à grand prix des transformations de ce type, lors de son passage de 1,5 à 1,9 GeV.

En deuxième lieu, une machine de faible énergie serait à recommander parce qu'elle seule pourrait produire les faisceaux de basse énergie dont la physique a besoin dans certains domaines, toute dégradation volontaire de faisceaux depuis les hautes énergies vers les basses énergies s'accompagnant de "*parasites*" altérant leur qualité. Cette observation ne semble pas fondée à de nombreux experts.

Au final, il semble qu'il y ait plus d'inconvénients techniques et scientifiques que d'avantages à sous-dimensionner l'énergie d'un synchrotron lors de sa conception et de sa construction initiale en dessous de la valeur optimale.

Au reste, comme l'a souligné à plusieurs reprises devant vos Rapporteurs, le Professeur Jochen SCHNEIDER, Directeur du Hasylab de Hambourg, la vraie question est non pas tant celle de l'énergie de la machine que celle de la stabilité et de la brillance des faisceaux.

Les progrès récents des onduleurs sont décisifs et ne sont d'ailleurs pas terminés, de sorte que l'énergie doit être définie de façon que leur utilisation soit possible.

Or le paramètre de la durée de vie est décisif et dépend étroitement de l'énergie. Une énergie "*basse*" oblige en effet à réinjecter à intervalles réguliers des électrons dans l'anneau. Or "*la différence entre des faisceaux d'une durée de vie de 18 h et des faisceaux de 2h est la même qu'entre un rêve et un cauchemar*".

Enfin, la question directe a été posée par vos Rapporteurs au Professeur Nils MARTENSSON, Directeur du MaxLab de l'université de Lund (Suède) qui vient d'achever la construction de l'anneau MAX II de 3^{ème} génération, dont l'énergie est de 1,5 GeV.

La réponse du Professeur Nils MARTENSSON, le 9 février 2000, emporte définitivement la question : "*si le synchrotron MAX II devait être construit aujourd'hui, compte tenu de l'évolution des besoins et des technologies, l'énergie choisie serait de 2,5 à 3 GeV*".

De fait, cette position recoupe largement celle de plusieurs experts internationaux, comme M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF ou le Professeur Jochen SCHNEIDER, selon laquelle il existe bien

autour de 2,5-3 GeV un optimum en énergie pour un synchrotron de 3^{ème} génération à construire en l'an 2000.

A cet égard, les choix faits par les concepteurs de SOLEIL pour son avant-projet détaillé semblent confirmés dans leur pertinence par le consensus international.

Ces choix sont schématisés dans la figure suivante, où l'on constate un recouvrement de ce synchrotron tant avec l'ESRF qu'avec le projet britannique puis anglo-français DIAMOND.

Figure 17 : Positionnement de SOLEIL par rapport à ses concurrents

Au total, il ne paraît pas justifié de s'éloigner des résultats de l'avant-projet détaillé SOLEIL dans le choix de l'énergie du synchrotron national indispensable aux chercheurs français.

2.2. Les voies et les moyens de diminuer les coûts

Parmi les contraintes pesant sur la réalisation d'un synchrotron figure bien évidemment la contrainte financière.

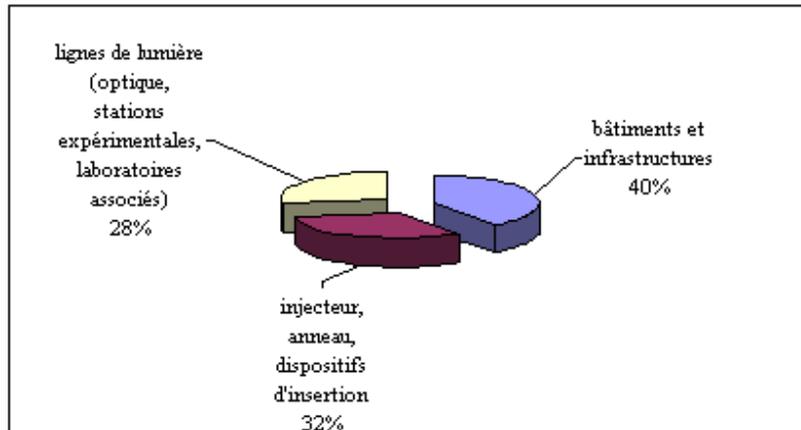
Vos Rapporteurs n'ont eu de cesse, au cours de leur étude, d'apporter des indications incontestables dans un domaine où les batailles de chiffres ont été nombreuses, rendues d'autant plus aisées à conduire mais aussi difficiles à comprendre que les conventions de calcul varient d'un interlocuteur à l'autre, incluant ou non les salaires, les équipements optionnels voire même les laboratoires d'assistance ou d'application.

Les résultats des différentes analyses que l'on peut faire à cet égard sont indiqués ci-après.

2.2.1. Les composantes du coût d'un synchrotron

En prenant comme exemple l'avant-projet détaillé SOLEIL, il apparaît que le coût d'un synchrotron hors salaires est composé à hauteur de 40 % du coût des bâtiments et des infrastructures, à hauteur de 32 % du coût de l'injecteur, de l'anneau de stockage et à hauteur de 28 % du coût des lignes de lumière.

Figure 18 : Répartition des coûts de construction hors salaires d'un synchrotron moderne



En valeur absolue et dans le cas de l'avant-projet SOLEIL, les coûts des bâtiments et des infrastructures ressortent à 437 millions de francs et comprennent notamment le réseau informatique.

Le poste " *source* " s'établit à 345 millions de francs, comprenant l'injecteur (80 millions de francs), l'anneau (190 millions de francs) ainsi que les postes relatifs aux lignes de lumière (75 millions de francs), à savoir les têtes de ligne d'un coût unitaire moyen de 1 million de francs, les dispositifs d'insertion d'un coût unitaire moyen de 1,7 million de francs et les autres équipements nécessaires.

Le poste " *expériences* " d'un total de 306 millions de francs correspond aux 24 lignes de lumière proprement dites (optique), aux stations expérimentales et aux laboratoires associés spécialisés dans la préparation d'échantillons.

Il est à noter que certains pays intègrent le coût des dispositifs d'insertion et des têtes de lignes dans le poste " *expériences* ", ce qui fait alors de ce poste le deuxième avec 32 % du total, après celui des bâtiments et des infrastructures.

Une autre remarque doit être faite.

Il découle de cette structure de coût qu'il peut être très avantageux, lorsque cela est possible, de construire un nouveau synchrotron sur le site d'un plus ancien, les dépenses de construction des bâtiments et des infrastructures, voire de l'injecteur, étant alors considérablement minimisées.

Cette pratique a été utilisée avec succès au MaxLab de l'université de Lund (Suède), au Hasylab de Hambourg ainsi qu'à Berlin.

2.2.2. L'influence de l'énergie d'un synchrotron sur son coût de construction

L'influence de l'énergie de l'anneau de stockage sur le coût du synchrotron a par ailleurs été étudiée à la demande de vos Rapporteurs tant par M. Yves PETROFF que par le LURE.

Selon les résultats du LURE, le coût d'un synchrotron de 1,5 GeV serait situé dans une fourchette de 800 à 1 200 millions de francs (voir tableau suivant).

Tableau 13 : Influence de l'énergie d'un synchrotron sur son coût de construction hors salaires

hypothèse	coûts de construction hors salaires	remarque
synchrotron de 1,5 GeV non évolutive et de taille réduite	820 MF	- circonférence de l'ordre de 90 m - nombre de dispositif d'insertion : 6
synchrotron de 1,5 GeV non évolutif et de taille optimale	1 180 MF	- circonférence de l'ordre de 260 m - nombre de dispositifs d'insertion : 10-12
synchrotron de 1,5 GeV pouvant évoluer vers 2,5 GeV	1 355 MF	- circonférence de l'ordre de 340 m - nombre de dispositifs d'insertion : 14 (+2)
Rappel : synchrotron de	1 350 MF	- circonférence de l'ordre de 340

2,5 GeV (SOLEIL)		<i>m</i> - nombre de dispositifs d'insertion : 14 (+2)
-------------------------	--	---

Quant au coût de construction d'une machine de 1,5 GeV construite à cette énergie avec la perspective de la porter ultérieurement à 2,5 GeV, il serait très proche de celui d'une machine construite d'entrée à 2,5 GeV.

Il découle de ces analyses que l'économie réalisable par la diminution d'énergie est faible en l'état actuel des choses.

Elle peut certes atteindre 40 % dans le cas où l'on adopte une taille réduite, mais c'est alors la diminution de moitié du nombre de dispositifs d'insertion physiquement logeables sur l'anneau qui est à la base de l'économie réalisée.

Si, au contraire, on considère qu'il est nécessaire de disposer d'un nombre de lignes comparable à celui d'une machine de 2,5 GeV, alors l'économie n'est plus que de 12 % et encore, sur cette baisse limitée, la réduction de 14 à 10-12 dispositifs d'insertion est-elle la cause principale de l'économie.

En définitive, il semble bien qu'il n'y ait aucune raison, d'ordre économique, qui puisse plaider valablement pour une réduction de l'énergie d'un synchrotron en dessous de la valeur optimale.

On peut aussi constater que la diminution d'un facteur 4 attendue d'un passage de 2,5 GeV à 1,5 GeV est en tout état de cause hors de portée, à moins d'une révolution technologique majeure et somme toute peu probable.

Une considération essentielle mérite d'être rappelée à cet égard, considération qui semble éliminer définitivement l'opportunité d'une machine de "basse énergie". C'est celle de la dégradation très importante de ses performances, selon le tableau suivant.

Tableau 14 : Performances comparées en fonction de l'énergie

	énergie	brillance à 10 keV	durée de vie des faisceaux
SOLEIL	2,5 GeV	10^{19}	20 h
Machine de 1,5 GeV	1,5 GeV	$6 \cdot 10^{15}$ wiggler	1,8 h
ALS (Berkeley)	1,5 GeV	10^{15}	1,6 h

2.3. Les possibilités de baisse des coûts d'investissement

Vos Rapporteurs, soucieux de mettre en évidence des solutions d'accroissement des ressources françaises en rayonnement synchrotron qui soient les plus économes possibles des deniers publics, ont exploré une autre piste, à savoir celle d'une construction concertée et programmée dans le temps, de plusieurs synchrotrons présentant des similitudes importantes.

L'idée est de rechercher des économies d'échelle résultant d'effets de série provoqués par des commandes groupées ou harmonieusement réparties dans le temps. Ce type de solution a pu être plaisamment décrite par le Professeur Georges CHARPAK comme la solution des machines " *clonées* ".

A vrai dire, une telle approche a été envisagée en 1997 dans un groupe de travail tripartite anglais, français et suisse.

C'est le mérite de M. Yves PETROFF que d'avoir souligné, début 2000, qu'une bonne coordination des achats lors de la construction de deux synchrotrons de caractéristiques voisines pourrait générer des économies de 20 à 30 % sur certains équipements et qu'au final le clone d'un synchrotron devrait coûter 20 % de moins en matière d'investissement et de fonctionnement que le synchrotron original.

Pour M. Yves PETROFF, c'est moins d'ailleurs l'effet de série que la négociation de réductions tarifaires en l'échange d'un contrat de

fourniture à long terme assurant un plan de charge sur plusieurs années aux entreprises contractantes, qui permettrait de générer de telles économies.

Il est incontestable que les effets de concurrence entre les donneurs d'ordre devraient être soigneusement évités, sauf, au contraire, à permettre aux fournisseurs d'augmenter leurs prix.

La vérité oblige toutefois à dire que l'unanimité ne s'est pas faite entre les experts interrogés par vos Rapporteurs sur ce sujet.

Pour les spécialistes du "*Central Laboratory for the Research Councils*" interrogés à Didcot, les économies d'échelle seraient limitées en raison du faible nombre de fournisseurs. Le LURE quant à lui note que des baisses de prix de 15 à 20 % seraient envisageables sur un petit nombre d'équipements. Toutefois, "*des économies d'échelle sont réalisables en partant de la R & D, que ce soit au niveau de la machine ou à celui des lignes de lumière*", sans qu'il soit possible de les chiffrer avec certitude.

Au débit de la thèse des économies d'échelle, il faut également faire figurer la tendance naturelle que pourraient avoir les constructeurs de favoriser leur industrie nationale.

Il reste que le fonctionnement de l'ESRF a démontré qu'avec des procédures d'appels d'offre ouverts à tous les pays, et des programmations soignées des commandes de nature à permettre aux entreprises de s'aménager un plan de charge de longue durée, il est possible de serrer les coûts avec une efficacité considérable.

Non démontrées a priori, ces économies d'échelle semblent toutefois possibles, à condition de faire preuve d'un art consommé du management de grands projets.

2.4. Les ressources indispensables

Les ressources indispensables en lignes de lumière pour la communauté scientifique française ont été recensées par l'équipe responsable de l'avant-projet détaillé SOLEIL, composée des représentants du CEA, du CNRS et de la recherche universitaire.

Pour sa part, le CEA a évalué ses besoins à 4 lignes de lumière équivalent temps plein dont "*0,8 ligne chaude*", ce qui correspond à 6 lignes sur 5500 heures par an.

La part actuelle du CEA dans la consommation française de rayonnement synchrotron étant actuellement de 15 %, elle subirait une augmentation pour atteindre près du quart de SOLEIL dans les 20 années qui viennent. Le CNRS quant à lui n'a pas donné ses évaluations de sa consommation future.

En tout état de cause, c'est sur la base des demandes de la communauté scientifique française que les caractéristiques de SOLEIL ont été arrêtées.

Comme on peut le voir sur le tableau suivant, il n'y a pas d'augmentation du nombre de lignes prévues par rapport à celle qui sont actuellement disponibles sur les synchrotrons DCI et Super-ACO du LURE.

Les améliorations attendues sont d'ordre qualitatif pour l'ensemble des lignes et portent sur le nombre de postes expérimentaux au plan quantitatif, grâce à un meilleur dessin de la machine.

Tableau 15 : Comparaison des ressources actuelles du LURE et des ressources prévues dans l'avant-projet détaillé SOLEIL

installation	nombre de lignes	remarques
LURE	46 lignes dont : - 21 sur DCI - 25 sur Super-ACO	- 21 postes expérimentaux sur DCI - 28 postes expérimentaux sur Super-ACO
SOLEIL (Avant-projet détaillé)	44 lignes, dont : - 30 issues de dipôles - 14 issues de dispositifs d'insertion	comptabilisation dans le plan de financement de 24 lignes seulement, dont : - 10 issues de dipôles - 14 issues de dispositifs d'insertion

On ne peut donc dire que l'avant-projet détaillé SOLEIL se caractérise par une inflation irraisonnée de la demande des spécialistes et des utilisateurs français des synchrotrons.

A cet égard, il faut rappeler qu'un des effets attendus de la construction de l'ESRF était de permettre la fermeture du synchrotron DCI, ce qu'une croissance de la demande de temps de faisceau plus rapide que prévue a rendu impossible.

Au plan qualitatif par ailleurs, l'examen des spécifications des lignes déjà définies dans l'avant-projet montre qu'il s'agit bien d'une machine polyvalente, permettant de traiter tous les types de demandes, que ce soit au regard de l'énergie des faisceaux ou à celui des techniques d'analyse de la matière mises en œuvre (voir tableau ci-après).

Tableau 16 : Caractéristiques des 14 lignes déjà définies dans l'APD SOLEIL

	nb / dispositif	type de rayonnement	applications
ligne très haute résolution	1 insertion	X mous (10 à 1500 eV)	- propriétés électroniques de la matière - surfaces- interfaces - solides, atomes et molécules
ligne haut flux + focalisation + polarisation	1 insertion	X mous (50 à 2000 eV)	- surfaces-solides - atomes- molécules - chimie-réactivité
ligne diffraction haut flux	1 insertion	X durs (3 à 30 keV)	- biocristallographie
ligne chaude	1	X durs (3 à 12 keV)	- échantillons fortement radioactifs

	dipôle de courbure		
lignes microanalyse et absorption haut flux	1 puis 2	X haut flux	- caractérisation d'éléments traces - caractérisation de matériaux
lignes très haute résolution	1 puis 2 dipôle de courbure	X mous	- études de surface - études physico-chimiques atomes et molécules
ligne haut flux + focalisation + polarisation	1 puis 2 insertion	X mous	- spectromicroscopie et phénomènes résonants - dichroïsme magnétique
ligne diffraction-diffusion	1 insertion	X mous-X durs (0,8-1,5 keV ; 2-3 keV ; 8-10 keV)	- diffraction de surface et méthodes complémentaires en ultra-vide - diffusion aux petits angles
ligne très haute résolution	1 dipôle	basse énergie	- photophysique - photochimie
ligne absorption et photoémission	1 dipôle	X mous (150-1500 keV)	- propriétés électroniques et magnétiques des surfaces
ligne absorption	1	X durs	- études in situ dans des

diffraction couplées	insertion	(4-25 keV)	conditions extrêmes de température et de pression - études de cinétique
ligne EXAFS dispersif (Extended X-ray Absorption Fine Structure)	1 insertion	X durs (4-17 keV)	- mesures en conditions extrêmes - dichroïsme circulaire magnétique - absorption
ligne optique	1 dipôle	VUV	- test optique et métrologie

Le projet SOLEIL depuis ses origines a subi un nombre très important d'audits positifs.

Comme on pouvait s'y attendre, il apparaît à vos Rapporteurs qu'il serait plus utile à la France de procéder à d'éventuels réglages fins sur l'avant-projet détaillé SOLEIL que de repartir d'une feuille blanche.

III – DES CONDITIONS GÉNÉRALES D'ORGANISATION À RÉNOVER

Au cours de la préparation de la présente étude, vos Rapporteurs ont noué des contacts intéressants et importants avec des responsables étrangers allemands, britanniques, suédois, suisses de grands instruments et de centres de recherche divers.

Ils ont également interrogé des chercheurs dont les travaux portent sur l'organisation générale et le financement de la recherche en France, sur l'articulation de la recherche publique et privée, ainsi que sur les relations entre organismes et disciplines.

De ces rencontres et des informations qui ont été rassemblées à cette occasion, il résulte des réflexions et des orientations qu'il semble

nécessaire de proposer en toile de fond de la question d'un synchrotron dans notre pays.

Comme on l'a vu précédemment, la satisfaction des demandes d'accès au rayonnement synchrotron produit par une machine nationale apparaît nécessaire en raison des avantages qu'elle procure aux utilisateurs.

Toutefois, l'évolution récente tant du fonctionnement de ce type particulier de grand instrument que des conditions générales d'organisation et de financement de la recherche dans notre pays, conduit à recommander des améliorations à tous les niveaux, y compris à celui des critères à utiliser pour définir la localisation d'un tel outil partagé.

1. La décentralisation des décisions et du financement

1.1. La continuité des efforts, une exigence de la recherche

Lors de deux communications remarquées, M. Roger BALIAN, membre de l'Académie des sciences, a souligné, au nom de la Société française de physique, l'importance des grands équilibres à maintenir dans les investissements de la recherche.

Ces équilibres concernent les parts respectives des différentes sous-disciplines et des diverses techniques. Un équilibre doit également être respecté entre le national et l'international et entre les équipements de base des laboratoires et les très grands équipements, à ceci près que les synchrotrons sont d'une nature particulière, compte tenu de leur caractère d'outil de service à la disposition d'une vaste communauté.

A ces notions, il semble nécessaire de rajouter celle de la continuité dans les efforts.

La visite du "*Deutsche Elektronen-Synchrotron*" (DESY) de Hambourg a été éclairante à cet égard.

Il s'y trouve en effet une accumulation exceptionnelle des très grands instruments scientifiques qui, d'une part, témoigne d'une continuité remarquable dans les efforts de recherche tant pour la physique des particules que pour le rayonnement synchrotron et, d'autre part, démontre l'intérêt scientifique et financier d'un développement graduel et cumulatif.

Par ailleurs, la politique suivie au Royaume Uni par le "*Central Laboratory for the Research Councils*" montre également tout l'intérêt qu'il y a à créer sur un même site une masse critique de grands instruments qui bénéficient mutuellement de leurs progrès respectifs et apportent un service de la meilleure qualité aux chercheurs grâce à la disponibilité immédiate de moyens d'analyse complémentaires.

Tous ces efforts nécessitent à l'évidence une continuité dans les efforts et la poursuite des recherches dans un nombre maximal de domaines, quelle que soit leur rentabilité immédiate, avec le souci permanent de favoriser l'interdisciplinarité qui livrera davantage de percées scientifiques que la somme des disciplines considérées isolément.

Mais l'équilibre et la continuité des efforts nécessitent de nouvelles approches dans notre pays, en matière de financement et de prise de décision.

1.2. La nécessité de financements stabilisés

Ainsi que l'a exprimé avec netteté M. Philippe LAREDO, sociologue de l'innovation à l'Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, "*le débat sur les très grands équipements dure depuis 15 ans en France. Si l'on pratiquait l'amortissement, il n'y aurait plus de débat et la tarification serait faite sur les bases économiques sérieuses, ce qui clarifierait les relations public-privé*".

De fait, l'absence d'amortissement des grands instruments a pour conséquence de dramatiser les décisions sur leur éventuel remplacement. Sans que cela nécessite un bouleversement de la comptabilité publique, que la question du synchrotron ne saurait à elle seule déclencher, il pourrait être judicieux d'examiner avec précision l'opportunité de mettre en place des systèmes spéciaux de réserve pour les grands organismes qui sont les concepteurs et les exploitants, soit directement soit indirectement, des grands instruments.

Par ailleurs, il paraît regrettable que la prise en compte des effets d'entraînement sur l'économie des grands instruments ne soit pas faite dans les décisions de l'Etat sur ces sujets, au contraire de l'approche extensive développée par les départements et les régions qui, bien souvent, pour déterminer l'aide à apporter à un projet d'investissement, intègrent les retombées directes et indirectes de l'opération qui leur est soumise.

Plus grave encore, il paraît étonnant que dans leurs calculs de coûts relatifs à des grands instruments, les pouvoirs publics, à l'inverse des

entreprises, ne chiffrent pas les retours non seulement pour le budget civil de recherche et développement mais surtout pour le Trésor public considéré dans son ensemble.

Or les retours d'un investissement comme un synchrotron pour le Trésor public sont estimés au tiers de la dépense, par deux experts consultés par vos Rapporteurs, M. Yves FARGE et M. Pierre POINTU.

Le tableau suivant compare deux situations extrêmes et hypothétiques dans ce domaine, avec d'une part la construction d'un nouveau synchrotron en France sur le site du LURE, pour en éviter la fermeture et d'autre part l'achat de lignes de lumière au Royaume Uni.

Sous réserve des hypothèses adoptées dans ce calcul, il apparaît en tout état de cause que la construction de SOLEIL avec ses 24 lignes de lumière, grâce à ses retombées économiques, fiscales et sociales pour le Trésor public et au fait qu'elle évite le coût très lourd de la fermeture du LURE, est moins coûteuse pour le Trésor public que l'achat de 7 lignes au Royaume Uni assorti de la fermeture du LURE dont le coût pourrait dépasser 500 millions de francs selon l'expérience de l'industrie.

Tableau 17 : Comparaison sommaire des coûts réels pour le Trésor public de la construction de SOLEIL et de l'achat de 7 lignes au Royaume Uni

	construction en France		construction au Royaume Uni	
	facteur	coût en MF	facteur	coût en MF
coût total	1	2 100	1/3	700
subvention	1/3	-700	0	-
retour Trésor public	1/3	-700	0	-
coût pour le BCRD	2/3	1 400	1/3	700
coût pour le Trésor public	1/3	700	1/3	700
capacités	100%	-	33%	

possédées				
coût de fermeture du Lure	Lure réintégré	0	1	450-750
coût pour le BCRD		0		450-750
coût pour le Trésor public		0		300-500

S'il est une seule conclusion, au demeurant réductrice, à tirer des considérations précédentes, c'est bien qu'il est indispensable de prendre en compte les recettes fiscales additionnelles qu'entraîne un investissement comme la construction d'un synchrotron et à l'inverse, les coûts considérables d'une éventuelle fermeture d'un laboratoire de 400 personnes comme celui du LURE.

Dans la perspective de la nécessaire stabilisation à moyen-long terme du financement des grands instruments, il paraît également indispensable que les intentions du Commissaire européen à la recherche, M. Philippe BUSQUIN, se traduisent dans les faits et qu'une part substantielle du PCRD prenne la forme d'aides allouées aux grands instruments les plus utiles à la recherche pré-compétitive.

1.3. Une nouvelle régulation d'acteurs de la recherche au demeurant plus autonomes

Sans doute est-il également nécessaire de revoir un certain nombre de fonctionnement de notre administration de la recherche.

Au vrai, la constitution de réserves spéciales et la rénovation des calculs des choix d'investissement devrait poser les bases d'une autonomie accrue des grands organismes de recherche.

Il reste que la constitution d'instances collégiales consultatives et d'échelons intermédiaires entre le ministère de la recherche et les grands organismes est sans doute à envisager, afin de permettre une régulation à la fois plus efficace et plus sereine de la communauté scientifique française.

2. Les moyens d'impliquer l'industrie dans un partenariat fructueux

Les difficultés des rapports entre la recherche publique et la recherche privée ont été jusqu'à un passé récent une antienne des discours sur la recherche dans notre pays.

Nul doute que la situation se soit améliorée dans les derniers mois, notamment grâce à la loi sur l'innovation votée en 1999.

Dans le cas concret du rayonnement synchrotron, les observations faites sur le terrain par vos Rapporteurs, montrent que les grandes entreprises recourent presque systématiquement à des collaborations avec des laboratoires publics pour mettre en œuvre le rayonnement synchrotron pour deux raisons dont l'une est avouable et l'autre l'est moins.

La raison essentielle est que le recours à des partenariats est le moyen pour les entreprises de bénéficier de compétences et d'une assistance. L'autre raison, moins avouable, est que dans ces conditions, le temps machine est gratuit, ceci reflétant au demeurant une organisation particulière de la recherche.

En tout état de cause, il semble possible tout à la fois de rénover et d'amplifier ces partenariats.

2.1. Une fiscalité à revoir pour les investissements dans les grands instruments

La première voie consisterait à faire bénéficier de crédits d'impôt les entreprises qui participeraient à l'investissement de construction dans un synchrotron, sous la forme de prises de participation dans des lignes de lumière.

Ces dispositions existent dans la plupart des pays qui parviennent à intéresser les entreprises à la construction de synchrotrons. Il semble opportun de faire jouer de tels mécanismes en France, non seulement pour alléger les coûts pour le Trésor public de la construction d'un nouveau synchrotron mais pour amplifier le mouvement déjà observé de rapprochement entre la recherche publique et privée.

2.2. De nouveaux partenariats privé-privé et public-privé à inventer

La constitution de consortiums d'entreprises devrait également être encouragée pour l'accès aux synchrotrons de façon à en rendre le coût encore plus accessible aux entreprises de taille moyenne.

Sans doute faudrait-il également essayer de mettre au point de nouvelles formules de coopération globale des entreprises avec les grands organismes de recherche pour leur faciliter l'accès non seulement aux synchrotrons mais également aux autres grands instruments d'analyse fine de la matière.

Il s'agirait en l'occurrence d'offrir aux entreprises, dans le cadre de l'organisation particulière française de la recherche, une plate-forme virtuelle analogue à celle qui existe concrètement au Royaume Uni avec le "*Central Laboratory for the Research Councils*" qui offre des services centralisés d'accès à ses machines, non seulement aux grands organismes de recherche mais aussi aux entreprises.

3. Une organisation optimale sur la base d'équipements modernes

La question de la disponibilité des installations du LURE est depuis le début de l'étude du dossier d'un nouveau synchrotron par le ministère de la recherche, une pomme de discorde grave sinon déterminante.

Vos Rapporteurs, qui ne sauraient esquiver cette question, se doivent tout autant de l'examiner avec soin, pour en discerner toutes les dimensions.

Dans la différence entre le niveau de fonctionnement de 4000 heures par an des installations du LURE et le niveau de 5500 heures de l'ESRF ou des synchrotrons du Hasylab à Hambourg, quels sont les rôles respectifs d'une part de l'obsolescence ou de l'usure des installations et d'autre part des dispositions statutaires ?

3.1. Une productivité améliorée grâce à des installations plus modernes

L'âge des installations du LURE est incontestablement un facteur limitatif de l'exploitation des synchrotrons DCI et Super-ACO. Ces limites s'expriment en nombre de personnels dont la présence est requise pour piloter la machine.

La vétusté entraîne des taux de panne supérieurs à ceux observés dans des installations plus modernes et des opérations de maintenance préventive plus longues qu'ailleurs. La consommation d'énergie des installations, enfin, est excessive par rapport aux normes des autres synchrotrons, ce qui conduit à arrêter l'exploitation pendant certaines périodes d'hiver où les tarifs de l'électricité sont particulièrement élevés.

En outre, avec des installations plus modernes, la complexité voire l'enchevêtrement des matériels serait moindre et réduirait la durée des changements techniques opérés sur les lignes de lumière et les postes expérimentaux. A cet égard, la différence d'aspect entre les installations du LURE qui résultent d'un développement non programmé et celles de l'ESRF organisée et planifiée rationnellement est éclatante et explique une part des différences de nombre d'heures de fonctionnement.

Ces facteurs objectifs plomberaient les comptes d'une exploitation industrielle. Dans le système budgétaire d'une installation comme le LURE, la variable d'ajustement est inévitablement la durée de fonctionnement.

Il est clair qu'avec des installations plus modernes, les activités du LURE pourraient être convenablement comparées à celle d'autres synchrotrons modernes, ce qui n'est pas le cas actuellement.

3.2. Des questions de statuts pénalisantes pour l'ensemble des parties

L'esprit de communauté qui existe au LURE, joint à la liberté justifiée dont le laboratoire a bénéficié pour avancer dans un développement rapide qui a satisfait tous les utilisateurs, ont pu faire croire à certains observateurs que ce laboratoire avait aménagé à sa façon des modes de fonctionnement exorbitant du droit commun.

Pour un expert reconnu mondialement, M. Yves PETROFF, qui a dirigé d'abord le LURE puis l'ESRF dont il a fait une mécanique d'horlogerie, la principale question qui se pose au LURE en terme d'organisation outre le handicap objectif que représente la vétusté de ses installations, est celle des règles de rémunération qui limitent au CEA et au CNRS la part dans le traitement des primes pour dépassement d'horaires et travail de nuit ou de week-end.

Pour autant, selon M. Yves PETROFF, il est possible de faire de la recherche à haute productivité dans le cadre de la fonction publique, à condition que les assouplissements au plafonnement des primes que l'on connaît dans certaines administrations soient appliqués au domaine des grands instruments.

S'agissant par ailleurs du statut juridique optimal d'un établissement gérant un synchrotron, des progrès sont certainement possibles, notamment dans le sens d'un renforcement du rôle du directeur du synchrotron dans son pouvoir managérial.

Selon M. Pierre POINTU, les projets de grands instruments sont souvent d'une nature entrepreneuriale, et comme tels, portés par une personnalité dotée de compétences non seulement scientifiques mais aussi de capacités d'initiative, d'entraînement des hommes et de combat contre les obstacles nombreux à renverser pour mener à bien une telle entreprise.

A cet égard, on peut estimer que le statut de société civile, adopté par l'ESRF et prévu par l'avant-projet SOLEIL doit être étudié plus avant.

4. Des critères objectifs pour une localisation régionale efficace

La mission de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques ne saurait s'étendre à la recommandation d'un site particulier pour l'implantation d'un synchrotron national.

Toutefois, il lui appartient de définir les critères qui, d'un point de vue scientifique, lui paraissent devoir être pris en compte par les pouvoirs publics pour la localisation du synchrotron national.

4.1. Des dessertes nationales et internationales de qualité

En raison du grand nombre de chercheurs visiteurs se rendant sur le site d'un synchrotron, la qualité et le nombre de dessertes est un point critique de sa fréquentation future.

Le contre-exemple de Trieste pour le synchrotron ELETTRA est souvent cité en raison de sa localisation excentrée et de la mauvaise qualité des transports reliant la ville au reste de l'Italie et de l'Europe.

Par ailleurs, on sait que dans la période actuelle d'indécision pour l'implantation de DIAMOND, les sites de Didcot, près d'Oxford mais au total distant de plus d'une heure de Londres et de l'aéroport international de Heathrow, et de Daresbury, à trente minutes de l'aéroport de Manchester international, rivalisent dans les médias pour vanter les qualités respectives de leurs dessertes.

Au reste, même si son impact n'est évidemment pas nul en matière d'aménagement du territoire, l'implantation d'un synchrotron ne semble pas à même de déclencher à elle seule le développement de transports vers un lieu qui n'en posséderait pas au préalable.

4.2. Une implantation au coeur d'une zone de recherche existante ou en création

Un autre paramètre fondamental du choix de la localisation semble être la densité du tissu scientifique local. A supposer que le lieu retenu ne possède pas de laboratoires préexistants, il conviendrait à tout le moins que l'implantation d'un synchrotron s'intègre dans un plan ambitieux et déterminé de construction d'une zone scientifique de haut niveau, rassemblant université, laboratoires publics et privés.

Mais la meilleure solution est sans doute de sélectionner comme lieu d'implantation une zone géographique déjà dotée d'un tissu universitaire, scientifique et industriel dense et dynamique.

Au reste, l'on a vu précédemment, à propos du centre DESY de Hambourg l'importance du développement graduel et continu des grands instruments.

Il est clair qu'il existe un avantage déterminant à renouveler sur place ou à proximité une installation vieillissante par la construction d'un nouveau synchrotron, puisqu'une telle démarche réduit à néant les coûts financiers et humains d'une éventuelle fermeture du site initial.

4.3. Un projet s'intégrant dans un plan d'ensemble pour les moyens d'analyse à la disposition de la recherche publique ou privée

Si l'on veut intégrer les dernières orientations stratégiques des pays ayant engagé un effort prioritaire pour leur recherche scientifique, il faut aller plus loin et considérer le futur synchrotron comme une pièce essentielle certes mais une pièce s'intégrant dans la constitution d'une plate-forme d'équipements scientifiques de premier niveau.

L'accès à un ensemble d'installations de premier ordre, synchrotron, lasers de puissance, source de neutrons, appareil de résonance magnétique nucléaire, laboratoires périphériques, apparaît en effet constituer un atout considérable pour les chercheurs.

Une telle plate-forme devrait par ailleurs disposer de capacités d'accueil, tant pour l'hébergement que pour les aménités de la vie pratique, afin d'ajouter à la pluridisciplinarité des installations techniques, l'effet "*cafeteria*" à la source de contacts et d'échanges fructueux.

Il est vraisemblable qu'à terme, étant donné la mobilité des entreprises internationales et la concurrence des technopôles à travers le monde, seules de telles plates-formes seront susceptibles d'attirer à elles et de garder les centres de recherche des grands entreprises mondiales,

grâce à leurs équipements matériels mais également grâce à leurs centres de compétences.

A cet égard, il est nécessaire de rappeler l'exemple du génopôle d'Evry, cité par M. Vincent MIKOL, directeur de recherche chez Aventis, dont la création a seule convaincu Rhône Poulenc Rorer d'y établir un centre de recherche qu'elle envisageait de délocaliser ailleurs en Europe ou aux Etats-Unis.

Conclusion

Les délais d'application de la recherche même fondamentale se sont réduits rapidement au cours des dernières années, au point de devenir un lieu privilégié de la compétition économique internationale.

Pour vos Rapporteurs, ce constat oblige notre pays à être particulièrement vigilant dans ses choix d'investissement de recherche.

Il ne semble pas en tout état de cause que la construction d'un synchrotron national puisse être évitée par le recours systématique à la location de lignes sur des machines étrangères.

Comme on l'a vu précédemment, l'utilisation du rayonnement synchrotron s'étend désormais à toutes les disciplines et à un nombre de chercheurs considérable, près de deux mille par centre.

Il convient donc de garder dans notre pays des compétences de conception dans ce domaine et de fournir les accès de proximité qu'attendent nos chercheurs.

Par ailleurs, le coût d'exploitation de machines situées à l'étranger est nettement plus élevé que celui de machines nationales, compromettant ainsi toute recherche d'économie par le recours à des partenariats européens.

Au reste, il est symptomatique de constater que tous les grands pays européens sauf l'Espagne ont fait le choix de posséder un ou plusieurs centres nationaux de rayonnement synchrotron.

La coopération européenne, bilatérale ou multilatérale, que l'on peut appeler de ses vœux et qui, selon de récentes informations, devrait enfin toucher au niveau de l'Union européenne les grands instruments, doit s'ajouter à des efforts nationaux déterminés et non pas y suppléer.

CONCLUSION GÉNÉRALE

C'est dans un climat de grande tension entre les pouvoirs publics et les chercheurs de la communauté des synchrotrons que vos Rapporteurs ont conduit leur analyse.

Même si le délai de trois mois dans lequel s'est déroulé ce travail est de fait très réduit, il semble que les lignes d'une opposition frontale, qui motivait la demande du groupe communiste de voir le Bureau de l'Assemblée nationale saisir l'Office d'une étude, ont bougé depuis lors.

Par une écoute attentive de toutes les parties et une objectivité aussi poussée que possible, vos Rapporteurs espèrent avoir contribué à rétablir, au moins en partie et cette fois sur des bases rationnelles, un dialogue interrompu.

Toutefois, même si le rayonnement synchrotron est un outil d'analyse de la matière qui, après des progrès exceptionnellement rapides, apporte une contribution technique essentielle au progrès des connaissances, les synchrotrons ne sont que des machines performantes et l'on peut se surprendre à penser que la question du renouvellement des installations vieillissantes du LURE ne méritait somme toute ni cet excès d'honneur ni cette indignité.

A vrai dire, le souci d'une bonne utilisation des deniers publics dans le domaine de la recherche ne saurait qu'être partagé. Les phases d'interrogation sur ces sujets sont profitables mais à condition qu'elles ne s'éternisent pas et surtout que l'on ne se trompe pas d'adversaire.

L'adversaire à combattre pour le bien de la recherche française est certes l'insuffisance du recrutement de jeunes chercheurs et le déficit de moyens de fonctionnement des laboratoires.

L'adversaire n'est certainement pas un grand instrument dont la vocation est de fournir des moyens d'étude de haut niveau à un ensemble considérable de chercheurs appartenant à plus de 700 laboratoires répartis sur tout le territoire.

Au vrai, avec la construction indispensable et urgente d'un nouveau synchrotron dans notre pays, il s'agit bien de doter les laboratoires français de moyens supplémentaires.

Bien sûr, s'il était possible de doter chacun des laboratoires français de micro synchrotrons performants, la centralisation de facto d'un grand instrument ne serait pas nécessaire et la question de SOLEIL ne se serait pas posée. Mais les techniques actuelles de production de rayonnements électromagnétiques de haute performance n'autorisent que la construction d'un grand instrument vers lequel les chercheurs se déplacent.

Ce grand instrument partagé et donc d'un type particulier présente, en contrepartie de ses grandes dimensions, l'avantage de produire naturellement le processus si important de l'interdisciplinarité, grâce aux contacts entre spécialistes de la machine et les utilisateurs de toutes disciplines, et de permettre l'effet de communauté si important pour la créativité des scientifiques et l'épanouissement de leurs recherches.

D'ailleurs, cette centralisation positive semble bien constituer un élément de la stratégie scientifique de différents pays, puisque, aussi bien, la tendance observée dans plusieurs pays est de rassembler une masse critique d'instruments et de compétences sur un même site pour créer des synergies bénéfiques pour la recherche.

Au reste, une stratégie scientifique ne semble pas pouvoir se résumer de nos jours à des choix dichotomiques. Au contraire, c'est de l'ensemble de la panoplie des moyens techniques et des types d'organisation dont il faut disposer.

A cet égard, la coopération franco-britannique constitue sans nul doute une voie qu'il convient d'explorer et de finaliser. La présence de chercheurs français sur d'autres synchrotrons européens est également une voie intéressante.

Mais tout indique que ces solutions délocalisées, si elles étaient les seules à être mises en application, ne suffiraient pas à satisfaire la totalité des besoins français, tout en générant des coûts par utilisateur supérieurs à ceux d'une solution autonome.

Il est donc indispensable de décider clairement et sans délai la construction d'un synchrotron national et pour cela de modifier le calendrier des différentes tranches prévues dans le plan des pouvoirs publics pour le rayonnement synchrotron.

Au-delà des positions de combat prises par les uns et les autres, il est temps que soit reconnu le bien fondé des positions exprimées par chacune des parties, tant il est vrai que les réformes de modes d'organisation et de fonctionnement, si elles peuvent être proposées par

le sommet, doivent être acceptées par les acteurs pour s'inscrire dans les faits.

En tout état de cause, il est temps que s'arrête une de ces guerres d'opinion franco-françaises que les vrais partenaires de la France contemplant toujours avec douleur et que soient détaillées et mises en pratique les orientations que vous proposent vos Rapporteurs et qui n'ont d'autre finalité que de vouloir combiner les atouts de la recherche française et européenne, sur des bases nationales fortes, pour le plus grand succès de nos chercheurs.

EXAMEN DU RAPPORT PAR L'OFFICE

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a procédé à l'examen du premier tome du rapport de M. Christian CUVILLIEZ, député, et de M. René TRÉGOUËT, sénateur, sur *" les conditions d'implantation d'un synchrotron et le rôle des très grands équipements dans la recherche publique et privée, en France et en Europe "*, dans sa réunion du mercredi 15 mars 2000.

M. René TRÉGOUËT, sénateur, rapporteur, a indiqué que le synchrotron est un très grand équipement différent des autres parce qu'il est employé par une communauté très large d'utilisateurs, et non pas par des équipes restreintes comme celles des satellites ou des collisionneurs. Les demandes d'accès au rayonnement synchrotron augmentent rapidement, et devraient être multipliées par deux dans les dix à vingt prochaines années. De nombreux pays de toutes dimensions, des Etats-Unis à la Suisse ou à la Thaïlande, possèdent des synchrotrons nationaux, l'Allemagne disposant, pour sa part, de cinq centres. Si l'on ne saurait être opposé à la coopération internationale, on n'imagine pas la France sans source nationale d'une énergie suffisante (2,5 GeV) pour les besoins de formation, d'interdisciplinarité et d'analyse de la matière d'une communauté de plusieurs milliers de chercheurs. En tout état de cause, une machine nationale s'impose aussi, car c'est aussi la solution la plus avantageuse en termes de coûts par utilisateur. Mais, une nouvelle dynamique devrait être créée autour de cette machine par de nouvelles dispositions d'organisation et de fonctionnement.

M. Christian CUVILLIEZ, député, rapporteur, a souligné que l'étude de ce dossier délicat, dans une situation de crise, a montré que les enjeux scientifiques du rayonnement synchrotron sont compris dans le monde entier. Or, en France et au Royaume Uni, c'est bien une division par deux des capacités en ligne de lumière qui est actuellement proposée. Les besoins avérés en rayonnement synchrotron ne sont pas en opposition avec l'accroissement des moyens des laboratoires, mais y contribuent directement. Au reste, la construction d'un synchrotron est compatible avec le budget de la recherche, et ne présente aucun aléa financier. En complément de la solution originale de 5-6 lignes de lumière sur DIAMOND, il convient de construire un synchrotron de 2,5 GeV en France, disponible plus rapidement, qui répondra aux besoins de nos chercheurs, et permettra de ne pas dissoudre une communauté en pointe dans la recherche mondiale.

M. Henri REVOL, sénateur, président, a félicité les rapporteurs pour leur étude, réalisée, au demeurant, dans le délai restreint et inhabituel de trois mois, et qui constitue le premier tome dont la suite sera consacrée aux très grands équipements. Il leur a ensuite demandé des précisions sur les modalités de fonctionnement du LURE, et sur leurs éventuelles propositions pour mieux associer l'industrie au futur synchrotron, et pour dégager ainsi de nouveaux moyens de financement de la recherche.

M. Christian CUVILLIEZ, député, rapporteur, a souligné que le rapport fait des propositions modifiant les conditions de gestion d'une machine nouvelle par rapport aux conditions actuelles de fonctionnement, ce qui suppose une ouverture d'esprit des personnels du LURE.

M. René TRÉGOUËT, sénateur, rapporteur, a précisé que, même si la vétusté des installations actuelles explique une partie de l'écart des durées d'utilisation entre le Lure et des équipements comparables, une nouvelle dynamique entrepreneuriale devra être créée, ce qui nécessite que la forme juridique du futur synchrotron ne soit pas trop rigide. A cet égard, l'exemple anglais du Wellcome Trust montre l'intérêt des fondations de financement de la recherche. De plus, les crédits d'impôt accordés dans certains pays étrangers pour l'investissement dans des synchrotrons expliquent l'association plus étroite des entreprises à ces équipements.

M. Pierre LAFFITTE, sénateur, après avoir félicité les rapporteurs pour leur excellent travail, a estimé, tout en étant réservé vis-à-vis des très grands équipements, qu'il convenait d'aménager les conditions de fonctionnement d'un futur synchrotron national. Une fondation pourrait être créée à cette occasion, bénéficiant de contributions d'entreprises françaises et européennes. Il faudrait également soutenir l'intention de M. Philippe BUSQUIN, commissaire européen à la recherche, de proposer que l'Europe prenne une part importante dans le financement et le fonctionnement des très grands équipements. Enfin, il faudrait veiller à prendre des mesures pour assurer la plus grande souplesse de fonctionnement possible à la future installation.

M. Christian CUVILLIEZ, député, rapporteur, a souligné que certaines grandes entreprises internationales peuvent décider de l'implantation d'un laboratoire en fonction de la seule présence d'un grand instrument, ce qui montre que les effets d'entraînement d'un tel équipement sur une zone économique donnée sont importants.

M. Jean-Yves LE DÉAUT, député, Premier vice-président, a ensuite félicité les rapporteurs pour avoir travaillé avec succès dans des conditions difficiles sur un sujet sensible, et a posé quatre questions,

sur la différence de leur évaluation de la demande de rayonnement synchrotron par rapport à celle du ministère, sur la concurrence des autres méthodes d'analyse de la matière vis-à-vis du rayonnement synchrotron, sur les conditions de financement de l'investissement dans le cadre d'un budget de la recherche à enveloppe limitée, et sur l'énergie optimale du futur synchrotron national.

M. René TRÉGOUËT, sénateur, rapporteur, a indiqué que les besoins réels des chercheurs français, déjà insatisfaits, ne pourraient pas être mieux pris en considération à l'avenir par une diminution de moitié des lignes disponibles. S'agissant du coût des solutions proposées, il est démontré que le coût par utilisateur des accès aux synchrotrons implantés à l'étranger dépasse de 55 % celui d'un synchrotron national. Par ailleurs, entre les différentes méthodes d'étude de la matière, il existe une complémentarité plutôt qu'une concurrence, le rayonnement synchrotron étant toutefois la seule technique, pour au moins encore cinq à dix ans, à permettre d'élucider la structure de protéines de masse moléculaire très importante. S'agissant de l'énergie de la machine, le niveau de 2,5 GeV correspond à un consensus mondial en terme d'optimum de brillance, de stabilité des faisceaux et de longueurs d'onde.

M. Ivan RENAR, sénateur, a souligné l'importance qu'il y aurait à prendre en compte les atouts des différentes régions candidates pour l'implantation d'un équipement qui aura des retombées importantes.

M. Christian CUVILLIEZ, député, rapporteur, a estimé qu'un synchrotron représente une force culturelle scientifique qui suppose un environnement de recherche très structuré.

Pour M. René TRÉGOUËT, sénateur, rapporteur, il n'entrait pas dans la mission des rapporteurs d'entrer dans le débat de la localisation, ce qui les a conduits à se limiter à proposer les critères d'un choix rationnel.

M. Claude BIRRAUX, député, a estimé que le rapport a bien remis en perspective la question du synchrotron en France, et a dégagé les enjeux nationaux d'une question au départ essentiellement locale.

M. Robert GALLEY, député, approuvant les orientations du rapport, a souligné l'importance, pour la France, de prendre des décisions courageuses de mobilisation de ses propres ressources, ainsi qu'elle l'a fait avec succès au début des années soixante-dix pour la commutation téléphonique électronique, et a demandé des précisions sur la politique américaine dans le domaine des synchrotrons.

M. René TRÉGOUËT, sénateur, rapporteur, a souligné que la demande d'un synchrotron national émane de l'ensemble de la communauté scientifique, et que les Etats-Unis engagent des efforts importants dans les sciences du vivant où ils bénéficient pourtant déjà d'une avance considérable. Compte tenu de l'intérêt d'un synchrotron pour la biologie structurale, pierre angulaire du post-génomique, il est indispensable que la France, si elle réexamine sa politique des très grands instruments, opère ses choix en fonction des effets d'entraînement de ceux-ci. Au reste, c'est l'Europe tout entière qui doit se ressaisir.

M. Henri REVOL, sénateur, président, a ensuite appelé les membres de l'office à se prononcer sur l'étude présentée par leurs collègues.

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a adopté à l'unanimité le rapport de MM. Christian CUVILLIEZ, député, et René TRÉGOUËT, sénateur, sur "*les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron*", et a confirmé la mission qui leur a été donnée d'étudier, dans la deuxième partie de leur étude, "*le rôle des très grands équipements dans la recherche publique et privée en France et en Europe*".

PERSONNALITÉS RENCONTRÉES ET VISITES D'INSTALLATIONS

date	Personnalités
me 15 déc 1999	M. Robert COMES, directeur du Lure
me 22 déc 2000	<p>M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF</p> <p>Saint-Gobain : M. Hervé ARRIBART, Directeur de recherche</p> <p>CEA : F. GOUNAND, I. NENNER, J. LACHKAR, JL LACLARE, A. MATHIOT, C. MADIC et</p> <p>M. VAN DER REST</p>
me 12 jan 2000	<p>10h-10h30 : M. MIKOL (Aventis) : le rayonnement synchrotron dans les sciences de la vie et l'utilité des grands équipements dans la formation de pôles de compétences</p> <p>10h30-11h : échanges de vues entre les membres du groupe de travail</p> <p>11h-12h30 : M. LEBASQUE, Mme CHANDESRIS, M. GAGNAT, Mme LEWIT- BENTLEY, M. POLIAN, M. SIMON, Intersyndicale du Lure</p>
me 19 jan 2000	9h-10h : échanges de vues entre les membres du groupe

	<p>de travail</p> <p>10h-11h : M. P. PAPON, Président de l'Observatoire des sciences et des techniques (OST)</p> <p>11h-12h30 : M. R. PELLAT, Haut commissaire à l'énergie atomique</p>
me 26 jan 2000	<p>9h30-10h30 : échanges de vues entre les membres du groupe de travail</p> <p>10h30-11h30 : M. Yves FARGE, ancien Président du Conseil de direction du projet SOLEIL</p> <p>11h30-12h30 : M. Claude COHEN-TANNOUDJI, Professeur au Collège de France, Prix Nobel de Physique</p>
je 27 jan 2000	<p>visite du LURE</p> <p>- 10h – 17h -</p>
ve 28 janv 2000	<p>- matin : visite de l'ESRF</p> <p>- après-midi : suite de la visite</p>
me 2 fév 2000	<p>9h30-10h30 : M. Jacques FRIEDEL, fondateur du conseil des grands instruments scientifiques ; Président honoraire de l'Académie des Sciences</p> <p>10h30-11h30 : M. Paul-Henri REBUT, ancien directeur du JET</p>

	<p>11h30-12h30 :M. E. BREZIN, Président, et</p> <p>Mme BRECHIGNAC, Directeur général – CNRS -</p>
--	---

date	personnalités
<p>me 9 fév 2000</p>	<p>9h30-10h30 : M. Nils MARTENSSON, Directeur du Max-Lab,</p> <p>Université de Lund, Suède</p> <p>10h30-12h30 : Table ronde avec les représentants des sociétés savantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - M. J-P HURAUULT, Président de la Société française de Physique (SFP) - M. R. BALIAN, Vice- Président de la SFP - M. J. TEIXEIRA, Secrétaire général de la SFP - Mme A-M LEVELUT, Prix Félix Robin 1999 de la SFP - M. LECOMTE (Association française de cristallographie) - Dr. Richard GIEGÉ (Société française de biochimie et de biologie moléculaire)
<p>lu 21 fév 2000</p>	<p>visite du SRS - Daresbury</p> <p>rencontre avec des représentants du Wellcome</p>

	Trust - Londres
ma 22 fév 2000	visite de l'Appleton Rutherford Laboratory - Didcot
me 23 fév 2000	<p><i>9h-10h : Les déterminants du coût des synchrotrons et les moyens de limiter les dépenses d'investissement et de fonctionnement afférentes</i></p> <p>M. J-P DAILLANT, M. M. BESSIERE, Mme D. CHANDESRIS, Mme MP LEVEL, M. R. FOURME (LURE)</p> <p><i>10h-11h : Analyse et comparaisons internationales des interactions entre les très grands équipements et la recherche publique et privée</i></p> <p>M. Philippe LAREDO, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris – Centre de Sociologie de l'Innovation</p> <p><i>11h-12h : Les avantages de la solution DIAMOND par rapport à SOLEIL</i></p> <p>M. Paul CLAVIN, Directeur de l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre</p> <p><i>12h-12h45 : Les modalités du soutien de l'industrie à la construction d'un synchrotron</i></p> <p>M. Jean-Claude LEHMANN, Directeur de la Recherche, Saint Gobain</p>

je 24 fév 2000	visite du Hasylab-Desy (Hambourg)
me 1 ^{er} mars 2000	<p>9h-10h : M. Vincent COURTILLOT, Directeur de la recherche, MENRT</p> <p>10h-11h : M. Pascal COLOMBANI Administrateur général du CEA</p> <p>11h-12h : M. MARGARITONDO, Président de la Table Ronde européenne pour le rayonnement synchrotron et les lasers à électrons libres</p>
me 1 ^{er} mars 2000	<p>9h-10h : M. Vincent COURTILLOT, Directeur de la recherche, MENRT</p> <p>10h-11h : M. Pascal COLOMBANI Administrateur général du CEA</p> <p>11h-12h : M. MARGARITONDO, Président de la Table Ronde européenne pour le rayonnement synchrotron et les lasers à électrons libres</p>

date	personnalités
je 2 mars 2000	<p>De 14h à 19h : audition publique – Salle Lamartine</p> <p><i>" L'importance des synchrotrons pour la recherche et</i></p> <p><i>les projets dans ce domaine en France et en</i></p>

	<p><i>Europe "</i></p> <p><u>Orateurs présents à la tribune</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - M. Roger BALIAN - M. Georges CHARPAK - M. Vincent COURTILLOT - M. Pierre-Gilles DE GENNES - M. Roger FOURME - M. Jacques FRIEDEL - Dr. Richard GIEGÉ - M. Guy OURISSON - M. Yves PETROFF - M. Jochen SCHNEIDER
me 8 mars 2000	9h30 – 12h30 : exposé par les membres du groupe de travail de leur point de vue personnel sur " <i>les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron "</i>
mercredi 15 mars 2000	16h15 : Réunion de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques pour l'examen du rapport de MM. CUVILLIEZ et TREGOUET
jeudi 16 mars 2000	11h : Conférence de presse

– ANNEXE 1 –

COMPTES RENDUS DES AUDITIONS *

I – Audition de M. Robert COMÈS, Directeur du LURE

*– mercredi 15 décembre 1999 **

II – Auditions de M. Yves PETROFF, Directeur général de l'ESRF, de M. Hervé ARRIBART (Groupe Saint Gobain) et des représentants du CEA

*– mercredi 22 décembre 1999 **

III – Audition de l'Intersyndicale du LURE et de M. Vincent MIKOL, Directeur de recherche Aventis

*– mercredi 12 janvier 2000 **

IV – Auditions de M. Jochen SCHNEIDER, Directeur du Hasylab (Hambourg), de M. Pierre PAPON, Président de l'OST et de M. René PELLAT, Haut commissaire à l'énergie atomique

*– mercredi 19 janvier 2000 **

V - Auditions de M. Jean-Pierre CHANGEUX, de M. Yves FARGE et de M. Claude COHEN-TANNOUDJI

*– mercredi 26 janvier 2000 **

VI – Auditions de M. Jacques FRIEDEL, de M. Paul-Henri REBUT,

et de M. Edouard BREZIN et Mme Catherine BRÉCHIGNAC

*– mercredi 2 février 2000 **

VII - Auditions de M. Niels MARTENSSON, directeur du Max Lab, et des représentants de la Société Française de Physique, de la Société Française de Biologie

et de Biochimie moléculaire et de l'Association Française de Cristallographie

*– mercredi 9 février 2000 **

VIII - Auditions des représentants du LURE, de M Philippe LAREDO,

de M. Paul CLAVIN et de M. Jean-Claude LEHMANN

*– mercredi 23 février 2000 **

IX – Auditions de M. Vincent COURTILLOT, de M. Pascal COLOMBANI, et de M. Giorgio MARGARITONDO

*– mercredi 1^{er} mars 2000 **

**I – Audition de M. Robert COMÈS, Directeur du LURE –
mercredi 15 décembre 1999**

Après les avoir invités à se présenter, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a remercié les membres du groupe de travail pour leur concours à la réalisation du rapport sur les conditions techniques d'implantation du projet de synchrotron SOLEIL, confié à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques par le Bureau de l'Assemblée nationale saisi par le Groupe communiste.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a souligné à cet égard la demande de l'Office que les Rapporteurs élargissent leur étude à l'examen du rôle des très grands équipements dans la recherche publique et privée.

En tout état de cause, M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, approuvé par M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur a estimé indispensable d'adopter une démarche rigoureuse et de traiter la problématique d'ensemble en répondant successivement à un ensemble de questions fondamentales. Qu'est-ce qu'un synchrotron ? La recherche française a-t-elle besoin d'un nouvel équipement de cette nature ? Un nouveau synchrotron doit-il nécessairement être implanté en France ou peut-on se satisfaire d'accéder à des moyens implantés à l'étranger ?

Un nouveau synchrotron plurinational serait-il suffisant pour satisfaire les besoins de plusieurs pays ? Si, enfin, il est démontré qu'un nouveau

synchrotron est nécessaire sur le sol français, le cadre fixé par l'avant-projet SOLEIL répond-il toujours aux besoins actuels ?

M. Pierre POINTU, membre du groupe de travail, a fait alors connaître son accord avec cette problématique et a insisté sur la dynamique créée par les très grands équipements. Il y a donc nécessité absolue de mesurer et de comparer, avant la prise de décision, l'impact scientifique, économique et sociologique de chacune des solutions envisageables.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a alors souligné que l'objectivité est indispensable à la crédibilité des futures recommandations du groupe tant auprès du monde scientifique qu'auprès du Gouvernement. **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a fait sienne cette position, en précisant qu'il ne saurait toutefois "*cacher son espérance*" quant aux conclusions du rapport.

La réunion s'est poursuivie par l'audition de **M. Robert COMÈS**, Directeur du LURE.

Après avoir brièvement rappelé les principales étapes de sa carrière, M. Robert COMÈS a indiqué qu'un synchrotron est certes un équipement coûteux mais aussi qu'il est aussi un équipement banal, puisqu'il en existe une soixantaine dans le monde, dont une trentaine de haut niveau répartis à peu près également en Asie, en Europe et en Amérique.

Le développement de ce type de grand équipement repose sur les avantages exceptionnels du rayonnement synchrotron. Parmi ceux-ci, il faut citer d'une part la large gamme de longueurs d'onde produites simultanément, qui permet à chaque utilisateur d'un synchrotron de sélectionner celle adaptée à l'expérience qu'il conduit, sans préjudice de celles nécessaires aux autres utilisateurs, d'autre part l'intensité et la concentration du rayonnement émis selon un pinceau très fin, ce qui permet une excellente définition d'images obtenues si nécessaire à partir d'échantillons de taille réduite, et, enfin, la pulsation du rayonnement qui ouvre la voie à l'étude de systèmes en évolution rapide, comme des réactions chimiques.

Trois générations de synchrotrons sont classiquement distinguées. La première génération date des années 1960 et 1970 et correspond aux installations dérivées de la physique des particules, comme le DCI d'Orsay. La deuxième génération correspond aux installations conçues et construites dans les années 1980 spécifiquement pour la production de rayonnement synchrotron, comme le Super-ACO d'Orsay. Les synchrotrons de troisième génération datent des années 1990 et se

caractérisent par la production de rayonnement non seulement dans les aimants de courbure mais aussi dans les onduleurs et les " *wigglers* " insérés dans les sections droites de l'anneau de stockage.

Compte tenu de la topographie des lieux, les installations du LURE, selon M. Robert COMÈS, ne pourraient que très difficilement être modernisées. En tout état de cause, le coût des installations actuelles d'Orsay, accélérateur et les deux synchrotrons DCI et Super ACO, ramené en pourcentage du PIB de leur date de construction serait très supérieur au coût d'un projet comme SOLEIL, à savoir deux milliards sur 8 ans, coûts de personnel et début de fonctionnement compris.

M. Robert COMÈS a ensuite indiqué que la vocation d'un synchrotron comme ceux du LURE est principalement la recherche fondamentale. En effet, la part de la recherche industrielle y atteint, dans le meilleur des cas, 10 % du total.

S'agissant des travaux de recherche fondamentale réalisés au LURE, leur répartition par discipline est de 47 % pour la physique, de 27 % pour la chimie et de 16 % pour la biologie et l'environnement, ce qui est comparable à ce que l'on observe dans d'autres pays.

Quant à la durée annuelle d'exploitation des installations du LURE, elle est obérée par deux facteurs. En premier lieu, l'ancienneté des équipements oblige à des opérations de maintenance fréquentes et relativement longues, en moyenne une semaine tous les deux mois, à quoi s'ajoutent deux mois d'arrêt en hiver et un mois en août. En second lieu, les contraintes budgétaires rendent difficile l'augmentation de la durée de fonctionnement des installations, car elle s'accompagnerait d'une croissance de dépenses en électricité déjà lourdes (7 à 8 millions de francs par an) et d'une augmentation des rémunérations et des effectifs du personnel difficile à mettre en œuvre.

A cet égard, M. Robert COMÈS a souligné que les contraintes de statut des personnels compliquent mais ne rendent pas impossible le paiement de primes au personnel ingénieurs et techniciens, en cas de travail de nuit. Ainsi les installations du LURE fonctionnent 24h sur 24 du lundi matin au samedi matin, y compris les jours fériés.

Avec 1800 utilisateurs par an, les installations du LURE reçoivent 900 demandes d'accès par an, se traduisant par des projets de recherche dont 600 sont acceptés par le comité de programme et 400 donnent lieu à des publications.

L'accès au synchrotron est gratuit pour les travaux destinés à publication, les frais de déplacement des chercheurs étant pris en charge par le LURE pour une dépense annuelle de 2 millions de francs. Un financement annuel de 5 à 6 millions de francs par le programme "*Accès aux grandes installations*" de l'Union européenne couvre par ailleurs la redevance d'utilisation pour les autres chercheurs européens. Au contraire, l'accès au Lure pour des travaux de recherche dits "*propriétaires*", c'est-à-dire à usage privé ne faisant pas l'objet d'une publication, est facturé 40 000 francs par jour.

Pour **M. Gilles COHEN-TANNOUJDI**, il apparaît ainsi clairement qu'il n'y a pas lieu d'opposer les dépenses d'investissement dans un synchrotron à des dépenses de soutien aux laboratoires. En effet, "*un synchrotron est un soutien aux laboratoires*".

M. Robert COMÈS a ensuite confirmé l'intérêt du LURE, en tant que "*dernière machine de basse énergie produisant des grandes longueurs d'onde*", dont les utilisateurs proviennent non seulement de France, mais aussi d'autres pays comme l'Allemagne ou l'Italie qui disposent pourtant de leurs propres synchrotrons.

Par ailleurs, selon M. Robert COMÈS, les comparaisons financières faites entre les différents synchrotrons en fonctionnement ou entre les différents projets actuels, ne sont pas toujours faites avec la rigueur indispensable. En effet, dans certains cas, les coûts d'investissement et de fonctionnement ne sont pas consolidés par incorporation de toutes les ressources (notamment aux Etats-Unis).

Au vrai, la seule méthode envisageable est celle des coûts consolidés, tant pour le chiffrage des investissements que pour celui des dépenses de fonctionnement. A cet égard, le budget consolidé du LURE s'élève en moyenne à 150-160 millions de francs par an et ne peut être mis en parallèle avec ceux d'autres laboratoires qu'à condition d'inclure dans leur budget l'ensemble de leurs dépenses de personnel et de fonctionnement, y compris, par exemple le coût de l'électricité (7 à 8 millions de francs par an au LURE).

En réponse à **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, s'enquérant de l'impact d'une installation comme le synchrotron sur le progrès scientifique, **M. Robert COMÈS** a fait valoir que les percées dans le domaine de la recherche résultent le plus souvent de progrès techniques comme ceux réalisés grâce aux synchrotrons.

M. Vincent MIKOL a précisé que le rayonnement synchrotron a seul permis l'élucidation de la structure de certaines protéines. C'est de fait

grâce aux synchrotrons que l'on a pu découvrir la structure de la protéase du virus du Sida, ce qui a permis de développer l'anti-protéase utilisée dans les thérapies nouvelles. De même, certains vaccins contre la grippe sont fondés sur un blocage du virus que l'on a pu mettre au point grâce à la connaissance de la structure de ce dernier.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, s'étant interrogé sur les synchrotrons du futur, **M. Robert COMÈS** a spécifié que les synchrotrons de 4^{ème} génération, s'ils font l'objet d'études conceptuelles, ne sont pas encore testés. Au demeurant, il s'agira vraisemblablement d'équipements plus complémentaires que substituables aux synchrotrons de 3^{ème} génération, leur haute brillance obligeant à un fonctionnement discontinu et à des analyses destructives. De même, un synchrotron de 3^{ème} génération n'apparaît pas concurrencé par le laser MegaJoule, qui ressort d'un tout autre domaine scientifique.

Enfin, un grand équipement comme un synchrotron de 3^{ème} génération ne se substitue pas aux appareils de laboratoire et renforce au contraire les besoins en équipements propriétaires, du fait des expérimentations préparatoires ou subséquentes à celles réalisées sur un synchrotron.

Selon **M. Pierre POINTU**, le rayonnement synchrotron permet d'aller plus loin dans la compréhension des structures, par exemple pour la biologie, ou dans celle des semi-conducteurs pour les microprocesseurs. Il constitue un perfectionnement supplémentaire, par rapport aux tubes à rayons X, qui eux-mêmes firent progresser la connaissance des alliages métalliques et autorisèrent des progrès substantiels en métallurgie, avec comme application particulière les turbines aéronautiques. D'une manière générale, le gain de nombreux ordres de grandeur en intensité pour l'exploration de la matière ouvre de nouveaux champs de connaissance et d'application.

Abordant la question de la localisation optimale d'un synchrotron, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a alors lancé un débat sur le rôle que les technologies de l'information et de la communication pourraient jouer pour faciliter l'accès à un synchrotron. Pour le moment, la présence physique des chercheurs sur le site d'un synchrotron apparaît indispensable. Comme l'a souligné **M. Jean GALLOT**, la complexité des techniques mises en œuvre exige des décisions de l'expérimentateur, à chaque pas d'une expérience de recherche fondamentale.

M. Vincent MIKOL a toutefois noté que l'envoi d'échantillons pour les manipulations de routine effectuées par les permanents de l'installation

était d'ores et déjà possible aux Etats-Unis et a souhaité la mise au point de telles prestations en France.

S'agissant de la coopération entre chercheurs, **M. Robert COMÈS** a confirmé que celle-ci est notablement renforcée par l'exploitation commune d'un synchrotron. En effet, d'une part, la présentation au comité de programmes des projets de recherche bien argumentés et le plus souvent pluridisciplinaires est nécessaire pour accéder à la machine, et, d'autre part, la présence conjointe des chercheurs résidents et des utilisateurs extérieurs autour d'un synchrotron pour les sessions d'expérimentation donne naissance à des échanges les plus souvent informels mais intenses.

A cet égard, **M. Gilles COHEN-TANNOUJDI** a insisté sur le rôle structurant d'installations comme les synchrotrons. Ainsi que plusieurs sociétés savantes l'ont relevé, dont la Société Française de Physique, d'une part des communautés scientifiques se construisent autour des grands équipements, et, d'autre part, la proximité des chercheurs et la bonne circulation de l'information permettent le repérage et le développement accéléré de disciplines émergentes.

Au surplus, comme l'a indiqué **M. Robert COMÈS**, les personnels ITA (ingénieurs, techniciens, administratifs), de même que les chercheurs permanents du LURE, font preuve d'une mobilité supérieure à la moyenne du CNRS, la moitié d'entre eux ayant changé d'affectation en dix ans et ayant ainsi apporté à d'autres laboratoires leurs connaissances acquises au LURE dans le domaine des techniques de pointe.

Répondant à une question de **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, sur l'impact économique du LURE, **M. Robert COMÈS** a précisé que les dépenses annuelles de fonctionnement hors salaires s'élèvent à 50 millions de francs par an, dont 40 millions vont aux entreprises de la zone économique d'Orsay. De surcroît, dans le sillage du LURE, opèrent une société de haute technologie spécialisée dans la mise en forme du rayonnement électromagnétique et commercialisant ses matériels dans le monde entier, ainsi que différents bureaux d'étude bénéficiant indirectement du savoir-faire des équipes du LURE et de commandes pour la maintenance et la jouvence de ce dernier.

Sur le rôle d'entraînement des grands équipements, **M. Vincent MIKOL** a estimé que la présence du génopôle d'Evry a décidé Rhône Poulenc Rorer, aujourd'hui Aventis, à y implanter son laboratoire de recherche en génomique. Dans le cas contraire, cette entreprise, fortement internationalisée au niveau de ses unités tant de production que de

recherche, aurait choisi de s'implanter aux Etats-Unis. Or la prochaine étape de la recherche sur le génome sera, selon toute probabilité, la génomique structurale. D'où l'importance de voir la France se doter d'un synchrotron moderne pour consolider le génopôle d'Evry, sauf à assister au transfert à l'étranger de structures de recherche initialement implantées en France.

Au vrai, le choix d'un investissement de recherche repose bien sûr sur les perspectives offertes par le développement technologique considéré et les promesses d'applications. Mais le choix de sa localisation dépend étroitement de l'environnement intellectuel et des ressources en équipements expérimentaux des zones en concurrence.

Une discussion s'est ensuite engagée sur le projet SOLEIL et ses principales innovations.

M. Robert COMÈS a chiffré le coût consolidé de construction de SOLEIL à 1,490 milliard de francs. Ce montant recouvre d'une part 1,064 milliard de francs pour l'investissement proprement dit, et, d'autre part, 68,44 millions de francs pour les dépenses de fonctionnement et 357 millions de francs pour les salaires, pour la période allant de l'année n de démarrage à l'année n+4.

Pour la période allant de l'année n+5 à l'année n+8, date d'achèvement de la construction, le coût total consolidé d'exploitation de SOLEIL s'élève à 533,37 millions de francs.

En régime de croisière, c'est-à-dire une fois la construction achevée en année n+8, le coût annuel d'exploitation de SOLEIL est de 220 millions de francs par an, dont 30 millions d'investissement pour la modernisation permanente de l'installation, 70 millions de dépenses de fonctionnement et 120 millions de francs pour la rémunération des personnels.

A cet égard, **M. Robert COMÈS** a réaffirmé qu'en prenant des méthodes de calcul identiques à celle utilisée pour le projet SOLEIL, le coût d'investissement à la charge de la France dans le projet DIAMOND atteint 600 millions de francs, soit près du double du montant rendu public par le ministère. Au reste, pour maintenir le LURE en fonctionnement, ainsi que pour acquérir et exploiter le tiers des lignes de lumière de DIAMOND, la dépense atteindra celle de SOLEIL, avec pour contrepartie des prestations largement inférieures.

S'agissant des caractéristiques techniques du projet SOLEIL, dont certaines peuvent sembler en retrait par rapport à celle de l'ESRF, **M.**

Robert COMÈS a expliqué qu'au moment de la conception de ce dernier, les faibles longueurs d'ondes correspondant aux rayons X "durs" ne pouvaient être obtenues que par des machines de forte énergie. Depuis lors, il est possible de produire des faisceaux de très courtes longueurs d'onde (X "durs") avec des machines d'énergie moyenne grâce à des entrefers d'aimants plus réduits dans les onduleurs des sections droites, ce qui conduit à un déplacement vers des longueurs d'onde plus faibles.

En conséquence, le projet SOLEIL, avec une puissance de 2,5 GeV peut couvrir des longueurs d'onde très faibles, ce qui justifie dans une certaine mesure que cette machine soit qualifiée par ses partisans de synchrotron "universel", sans pour autant faire double emploi avec l'ESRF. En toute hypothèse, ainsi que l'a indiqué **M. Gilles COHEN-TANNOUDJI**, il ne s'agit pas de refaire l'ESRF avec SOLEIL mais de bénéficier des connaissances acquises avec l'ESRF pour déployer tout le spectre de longueur d'onde avec une énergie modeste, c'est-à-dire à moindres coûts.

S'il fallait émettre une réserve sur les choix faits pour le projet SOLEIL, qui se caractérise par 24 lignes de lumière - dont 16 résultant de dispositifs d'insertion implantés sur des sections droites - accessibles 5500 heures par an, ce serait, selon **M. Robert COMÈS**, pour regretter dans l'architecture actuelle, le nombre relativement insuffisant de sections droites, qui, comme on le sait, délivrent le rayonnement synchrotron le plus performant.

Sur le sujet des besoins en rayonnement synchrotron dont les Rapporteurs ont à nouveau souligné qu'il est essentiel, **M. Robert COMÈS** a rappelé que, jusqu'ici, les demandes d'accès ont cru plus rapidement que prévu.

En conséquence, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a émis l'idée selon laquelle l'une des conclusions du rapport pourrait bien être, après des réflexions complémentaires, que le Royaume-Uni et la France ont l'un comme l'autre besoin de leur propre synchrotron national.

Pour **M. Robert COMÈS**, il apparaît clair, en tout état de cause, que le projet SOLEIL d'une part n'est pas à l'échelle européenne et d'autre part ne participe pas de la catégorie habituelle des très grands équipements, au sens budgétaire du terme. Il s'agit au contraire d'un équipement de catégorie intermédiaire, répondant à une demande d'utilisateurs multiples dont les besoins doivent être pris en compte au plus près dans la définition de la machine.

Selon **M. Pierre POINTU**, le questionnement sur l'existence d'un marché et de besoins revêt une importance primordiale dans toute décision d'investissement de cette importance. Toutes les analyses et les informations jusqu'ici rassemblées concordent sur la croissance de la demande d'accès au rayonnement synchrotron. Les utilisateurs potentiels appartiennent tant à des laboratoires publics qu'à la recherche industrielle. Les disciplines concernées vont des sciences de la matière, par exemple les semi-conducteurs, aux sciences de la vie, par exemple la recherche pharmaceutique. Au reste, un synchrotron n'a pas pour objet principal de servir la haute recherche fondamentale et la découverte d'un paradigme universel mais de constituer un nouveau moyen technique au service de la recherche intermédiaire ou pré appliquée.

Pour conclure, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a remarqué qu'un accord bilatéral entre la France et le Royaume-Uni, comme celui qui est en cours de négociation, pourrait prendre différentes acceptions et nécessite en réalité une réflexion globale.

S'il s'agit pour le moment de négocier une prise de participation de la France dans une machine située à Manchester ou à Oxford, la coopération bilatérale pourrait aussi prendre la forme de la construction simultanée d'un synchrotron dans chacun des deux pays, avec une complémentarité choisie d'emblée pour atteindre une meilleure performance d'ensemble.

A cet égard, **M. Robert COMÈS**, Directeur du LURE, a remarqué qu'en l'état actuel des choses, le projet SOLEIL de 2,5-2,7 GeV et le projet DIAMOND de 3 GeV diffèrent déjà par leurs niveaux d'énergie mais que d'autres complémentarités pourraient également être trouvées.

Ainsi, par d'autres voies que celle de la participation au projet DIAMOND, pourrait être obtenu le renforcement mutuel des laboratoires français et anglais, considéré comme un objectif prioritaire par le ministère de la recherche.

II –Auditions de M. Yves PETROFF, Directeur général de l'ESRF, de M. Hervé ARRIBART (Groupe Saint Gobain) et des représentants du CEA – mercredi 22 décembre 1999

Après avoir remercié les membres du groupe de travail ainsi que les représentants des organismes invités pour leur participation à la préparation du rapport de l'Office sur les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur** et **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, ont donné la parole à

M. Yves PETROFF, Directeur général de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility).

Ainsi que l'a exposé M. Yves PETROFF, l'ESRF connaît un succès remarquable et croissant dans la communauté scientifique, avec ses 3100 utilisateurs en 1999 opérant sur ses 44 stations expérimentales simultanées à raison de 5600 heures par an.

Construit pour un coût total de 3,6 milliards de francs 1987 sur la base d'une convention internationale à laquelle les principaux pays européens sont parties prenantes, l'ESRF délivre un rayonnement d'une brillance dix milliards de fois supérieure à celle d'un tube à rayons X, dépassant ainsi d'un facteur 300 son objectif initial.

Sur un plan scientifique, l'ESRF a rendu possible des avancées scientifiques importantes, comme, par exemple, l'étude de l'hydrogène et de la glace sous des pressions très élevées (1,7 million d'atmosphères), la structure du nucléosome ou de virus de taille importante.

Parmi les développements les plus rapides des technologies liées au synchrotron ESRF, M. Yves PÉTROFF a cité la réalisation d'études dynamiques de systèmes évolutifs ou d'études structurales en trois dimensions, ainsi que l'imagerie par rayons X.

Pour autant, la croissance des débouchés remarquée de l'ESRF ne signifie pas que tout nouveau synchrotron doive en emprunter les caractéristiques. Pour M. Yves PETROFF, une spécialisation sur les rayons X à l'instar de celle retenue pour l'ESRF serait une aberration, dans la mesure où les rayons X mous et les rayons UV se prêtent particulièrement bien à l'étude de nombreux mécanismes physiques, en particulier les structures électroniques.

Globalement, le taux de retour sur l'investissement que constitue l'ESRF apparaît excellent pour la France. Alors que sa contribution représente 27,5 % du budget annuel, le temps d'accès au faisceau des équipes françaises représente 30 % du total, tandis que sur les 400 millions de francs de budget annuel, 300 millions sont effectivement dépensés en France.

Au final, l'ESRF rencontre l'intérêt, non seulement de la recherche publique mais aussi celui de l'industrie.

Selon les statistiques fournies par M. Yves PETROFF, les utilisations industrielles du rayonnement synchrotron à l'ESRF sont d'environ 20 %

du temps de faisceau total. Dans la pratique, les laboratoires de l'industrie accèdent au faisceau dans le cadre de projets présentés au comité de programme en coopération avec des laboratoires publics.

De plus une trentaine de compagnies industrielles achètent directement du temps de faisceau. On note un fort accroissement de la demande : 800 heures en 1998 et environ 4000 heures prévues pour 2000.

L'ESRF est aussi en discussion avec un consortium de groupes pharmaceutiques européens pour créer un laboratoire industriel sur le site, dont le but serait la cristallogénèse et la résolution de structures en trois dimensions.

Au vrai, cet intérêt croissant de l'industrie pour l'ESRF s'inscrit dans la même évolution que celle observée aux Etats-Unis et au Japon, mais avec une différence considérable car les grandes entreprises industrielles ont pris à leur charge la construction de lignes de lumière aux synchrotrons de Berkeley et d'Argonne, aidées en cela par la déductibilité fiscale de tels investissements et des charges salariales plus faibles.

L'ESRF entend, pour sa part, répondre à la croissance de la demande industrielle en proposant des équipements et des prestations toujours mieux adaptés aux besoins en imagerie X et en recherches sur la structure des protéines.

Une des priorités de la direction est de réduire les temps d'accès aux installations, dans la mesure où l'industrie recherche des accès immédiats. En outre, la construction d'une ligne de lumière pour la microélectronique réservée à des usages industriels devrait être ouverte en 2000. Pour M. Yves PETROFF, si l'intérêt récent de l'industrie se confirme dans les années à venir et si la vente de temps de faisceau dépasse 10 % du total, il sera nécessaire de créer une structure commerciale indépendante.

Pour M. Yves PETROFF, la capacité à réagir vite est vitale dans la recherche contemporaine. Les contraintes d'une mise sur le marché rapide des produits s'ajoutent en l'occurrence à la réduction générale du délai de 10 à 15 ans autrefois observé entre les découvertes de la recherche fondamentale et les applications pratiques, pour restreindre la durée des programmes de recherche.

La question de la structure juridique et du statut du personnel de l'ESRF a ensuite fait l'objet de questions et de précisions additionnelles.

S'agissant du mode de gestion de l'ESRF, M. Yves PETROFF a souligné qu'il s'agit d'une structure de droit civil dans laquelle les personnels à statut sont détachés. Les contraintes du LURE sont ainsi évitées, où le jeu des dispositions statutaires oblige au versement de primes pour travaux de nuit mais en plafonne le niveau à hauteur de 30 à 35 % du traitement de base, ce qui limite le nombre d'heures de fonctionnement à 3000-3500 heures par an. M. Yves PETROFF a souligné toutefois que si le ministre de la recherche était aussi efficace sur ce plan que le ministre des finances, le problème serait résolu immédiatement.

Au demeurant, **Mme NENNER** (CEA) a observé que l'avant-projet détaillé pour SOLEIL décalque les choix de l'ESRF. Ainsi, l'équipe de conception de SOLEIL a choisi de recourir à une société civile et a aussi préconisé le détachement des personnels à statut.

*

La réunion s'est poursuivie par l'audition de **M. Hervé ARRIBART**, directeur de recherche au Groupe Saint Gobain. Dans ce groupe dont les dépenses de recherche et développement représente environ 2 % d'un chiffre d'affaires de 120 milliards de francs, l'utilisation de grands équipements comme le synchrotron n'est pas encore très répandue. Les études relatives aux propriétés optiques et aux revêtements des verres, dont la production représente près de 50 % de l'activité du groupe, donnent lieu à l'acquisition d'environ 10 jours par an de temps de faisceau au LURE et à l'ESRF. Ces travaux sont le plus souvent réalisés en collaboration avec des équipes du CNRS.

Quant à la recherche et développement sur les céramiques, un autre pôle important d'activités pour Saint Gobain, elle est effectuée aux Etats-Unis et ce sont alors les synchrotrons nord-américains qui sont utilisés, notamment pour l'analyse des motifs cristallins avec joints de grain relatifs aux matériaux réfractaires.

Un autre domaine d'application du rayonnement synchrotron pour Saint Gobain est celui de la vérification de matériaux comme les monocristaux utilisés dans certains détecteurs médicaux. Dans ce cas, le groupe Saint Gobain recherche un accès direct et le plus rapide possible à tout faisceau disponible.

Mais, d'une manière générale, l'industrie recourt à la collaboration de laboratoires publics pour mettre en œuvre le rayonnement synchrotron, afin d'une part de diminuer ses coûts et d'autre part de bénéficier de l'expertise méthodologique et expérimentale indispensable.

D'autres industriels des matériaux que Saint Gobain utilisent d'ores et déjà le rayonnement synchrotron. Au cours des entretiens Physique-Industrie qu'il a organisés, M. Hervé ARRIBART a ainsi pu relever que les temps de faisceau s'élèvent à 20-30 jours par an pour des entreprises métallurgiques comme Usinor et Pechiney, à 15 jours par an pour les cimentiers (Lafarge et Ciments français), les industriels du bois et la chimie des polymères.

Pour autant ces chiffres ne sauraient être considérés comme stables à l'avenir. M. Hervé ARRIBART a ainsi jugé de plus en plus intéressantes les possibilités offertes par les synchrotrons modernes en matière d'imagerie X, de tomographie et d'imagerie de surface. Il a observé un démarrage rapide de ces techniques, notamment sur les installations allemandes Bessy II de Berlin et italienne d'Elettra à Trieste.

Pour conclure, M. Hervé ARRIBART a noté que Saint Gobain n'échappe pas au mouvement d'internationalisation de la recherche observé dans de nombreux entreprises. Pour le moment, la recherche du groupe s'effectue en France pour les deux tiers et aux Etats-Unis pour le tiers restant. La base de la recherche de Saint Gobain est encore considérée comme française. Mais en l'absence de ressources accessibles en rayonnement synchrotron sur le territoire français, les expérimentations seraient basculées sans hésitation sur les Etats-Unis, précédant sans doute l'ensemble des ressources de recherche.

En l'occurrence, la disponibilité d'outils de premier plan est une nécessité pour fixer en France les laboratoires du groupe. Elle ne saurait toutefois suffire. Un groupe internationalisé comme Saint Gobain attend également une aide de la communauté scientifique française pour la mise en œuvre d'équipements de haut niveau comme les synchrotrons.

*

Le Commissariat à l'énergie atomique avait été invité à déléguer des représentants à l'audition afin qu'ils puissent expliciter les besoins de ce grand organisme de recherche en rayonnement synchrotron.

A ce titre, **Mme Irène NENNER** a remis aux Rapporteurs une note décrivant le rôle actuel et prévisible du rayonnement synchrotron au CEA, note jointe en annexe au présent compte rendu. On se bornera en conséquence dans la suite à résumer les idées principales évoquées par les intervenants et à retracer les échanges de vues entre les participants.

M. François GOUNAND, Directeur des sciences de la matière au CEA, a souligné que tous les départements du CEA opèrent sur des synchrotrons, que ce soit en France au LURE et à l'ESRF ou à l'étranger, en Europe, aux Etats-Unis et en Asie. Au total, la part du CEA dans les temps d'accès consommés par des équipes françaises atteint probablement le chiffre de 15 % du total national. Le mode d'accès choisi par le CEA est dans tous les cas celui du partenariat : partenariat avec l'industrie ou le CNRS et partenariat dans l'utilisation de lignes de lumière partagées par plusieurs utilisateurs.

Pour M. François GOUNAND, au vu de leur fonctionnement, les synchrotrons, toujours partagés par de nombreux utilisateurs différents, apparaissent clairement comme des "*users' facilities*", c'est-à-dire des équipements au service des utilisateurs. D'autres équipements ressortissent d'ailleurs de la même catégorie : les sources de neutrons comme Orphée.

Mais, en tout état de cause, ces installations n'ont rien de commun avec les très grands équipements classiques que sont les accélérateurs pour la physique des particules ou les satellites.

Hors ESRF, les besoins du CEA en rayonnement synchrotron de 3^{ème} génération s'élèvent pour l'avenir à 4 lignes de lumière équivalent temps plein (5000 heures), le tout sur une quinzaine de lignes instrumentées différemment les unes des autres. En matière de longueurs d'onde, les deux tiers des besoins portent sur les rayons X – X "*durs*" et le dernier tiers sur les X –UV voire IR. A ce total s'ajoute l'accès à un laser à électrons libres.

M. Charles MADIC a ensuite détaillé en quoi la direction du cycle du combustible du CEA compte sur le rayonnement synchrotron actuellement et pour l'avenir. Si l'amont du cycle, c'est-à-dire le procédé SILVA de séparation isotopique en cours de développement en vue de la préparation des combustibles nucléaires, n'a pas encore manifesté son intérêt pour cette technique, en revanche l'aval du cycle l'est particulièrement pour l'étude de la séparation des produits de fission et des actinides mineurs ainsi que pour celle du conditionnement optimal des déchets radioactifs et des cinétiques de dispersion des radioéléments.

Les équipes de la DCC utilisent une ligne à LURE spécialement équipée qui permet de travailler avec de la matière faiblement radioactive mais aussi la ligne dite "*chaude*" du synchrotron de Stanford aux Etats-Unis, ce qui est onéreux et oblige à résoudre des difficultés pratiques et

administratives innombrables lors du transport transfrontière d'échantillons radioactifs.

Si la présence d'une ligne dite "*tiède*" à l'ESRF répond à certains besoins, tant le CEA en partenariat avec les industriels du nucléaire que le CNRS et la recherche universitaire, soit au total une quarantaine de laboratoires, appellent toutefois de leurs vœux la réalisation d'une ligne "*chaude*" en France.

M. Georges CHARPAK a pointé à cette occasion l'intérêt du rayonnement synchrotron pour l'étude des mécanismes relatifs aux radioéléments, en ce qu'il permet de ne manipuler que des quantités très faibles de ceux-ci. Ce sont bien les exploitants du nucléaire qui devront être sollicités pour le financement d'une ligne dite "*chaude*" sur tout projet de nouveau synchrotron.

M. Alain MATHIOT a ensuite présenté les besoins de la direction des technologies avancées du CEA. La plate-forme de Grenoble, constituée des laboratoires du Leti-CEA, de ST Microelectronics, du CNRS et des universités a acquis une importance mondiale, renforcée encore par l'ESRF. Si le rayonnement synchrotron ne paraît pas avoir de perspectives industrielles dans la production des microprocesseurs par lithographie à rayons X, en revanche il représente un outil d'analyse et d'imagerie indispensable et contribuera sans aucun doute au passage à la microélectronique quantique. En outre, le rayonnement synchrotron trouve des applications de première importance dans la métrologie, une arme économique de première importance pour les standards et les normes. Il a également souligné l'intérêt des techniques disponibles sur les synchrotrons de 3^{ème} génération pour l'étude fine du comportement des matériaux et la mise au point de modèles permettant de prévoir leur évolution dans le temps, dans le cadre des programmes nucléaires qui sont au cœur de la mission du CEA, qu'il s'agisse de prolonger la durée de vie des centrales actuelles ou de définir celles du futur, plus sûres, plus fiables et plus économiques que les actuelles. Pour cette raison également, la disponibilité d'une ligne "*chaude*" en France est également importante.

M. Jean LACHKAR a ensuite explicité la demande en rayonnement synchrotron émanant de la direction des applications militaires (DAM) du CEA. De nombreuses expériences de validation des simulations relatives à la force de dissuasion font appel au rayonnement synchrotron. La DAM utilise actuellement deux lignes de lumière au LURE. A l'avenir, il faudra gagner en brillance pour ces expérimentations. Au surplus, l'étude des plasmas exigera également des temps d'accès plus importants. Les statuts de l'ESRF interdisant

toute recherche à finalité militaire, la question est donc posée de nouvelles ressources pour le CEA pour ses recherches dans ce domaine.

M. VAN DER REST a complété le panorama des besoins du CEA en retraçant ceux de la direction des sciences du vivant de ce même organisme. Le rôle du rayonnement synchrotron dans les études structurales des protéines est en croissance forte, avec une collaboration étroite entre la recherche publique et la recherche industrielle. Notant que l'Institut de biologie structurale, unité mixte CEA-CNRS a été implanté à Grenoble du fait de la présence de l'ESRF, M. VAN DER REST a également signalé les interactions fortes du CEA avec Bio Mérieux à Saclay, en liaison avec le LURE.

S'élevant en faux contre l'opinion selon laquelle les jours de la biologie structurale seraient derrière nous, M. VAN DER REST a au contraire estimé que la bioinformatique ne constitue pas la seule voie de progrès en matière de génomique. Au contraire, il est capital de reconnaître un grand nombre de structures de protéines. **M. PETROFF** a estimé à cet égard que les avancées obtenues par la bioinformatique seront sans doute lentes, en raison de la complexité de la modélisation de protéines à plusieurs centaines de milliers d'atomes.

M. Vincent MIKOL a abondé dans le même sens. Après l'âge pré-génomique où il s'est agi de décrire la structure d'une protéine, les sciences du vivant abordent l'ère post-génomique avec environ 140 000 nouvelles cibles. Selon toute probabilité, les structures des protéines seront brevetables. Une course de vitesse est donc engagée dans laquelle l'accès à des synchrotrons modernes et disponibles sans délai jouera un rôle déterminant.

Mme NENNER, en évoquant les besoins de la direction des sciences de la matière souvent en liaison avec d'autres directions du CEA et l'industrie, besoins centrés sur les interactions rayonnement-matière, la chimie, les matériaux et les nanostructures, a clos la présente évaluation. La physico-chimie de ces matériaux et les investigations sur leurs propriétés physiques font appel à un ensemble de méthodes d'analyse, aux premiers rangs desquelles figurent bien sûr la résonance magnétique nucléaire, la diffusion neutronique mais aussi le rayonnement synchrotron. A ce titre, tant l'ESRF que le LURE sont fortement sollicités et devraient l'être encore plus à l'avenir, ce qui pose la question de la continuité de l'accès à des machines et le problème du remplacement du LURE arrivé en fin de vie.

Pour conclure la réunion, **M. René TRÉGOUËT** a demandé aux participants de donner, en toute objectivité, leur recommandation sur l'avenir du rayonnement synchrotron en France.

M. Yves PETROFF a observé que la décision sur un nouveau synchrotron engage non seulement plusieurs milliards de francs mais aussi et surtout l'avenir de toute une communauté scientifique. En tant que telle, elle exige une instruction d'une qualité incontestable, ce qu'un examen par une commission de scientifiques qualifiés, comme aux Etats-Unis sur une question identique, aurait permis de réaliser, au contraire d'un rapport secret confié à une seule personne. Or il n'existe actuellement aucun projet détaillé et chiffré.

M. Yves PETROFF a par ailleurs estimé que, si une collaboration européenne doit être recherchée lorsqu'elle économise du temps et de l'argent, la solution DIAMOND, pour autant qu'on la connaisse avec suffisamment de détail, se traduira par un retard d'environ 3 ans par rapport au projet SOLEIL et par un coût équivalent à ce dernier. En particulier, les 350 millions de francs annoncés par le ministre pour la participation à DIAMOND lui paraissent totalement irréalistes. Selon toute probabilité, les lignes de lumière ont été oubliées dans le décompte. Toutefois les prestations seront au total sensiblement inférieures puisqu'aucune ligne de lumière complémentaire n'apparaît disponible en Europe, sauf une ou deux en Suisse.

M. Georges CHARPAK s'est dit, pour sa part, frappé par la difficulté de se forger une opinion tant les positions sont extrêmes sur ce dossier. Les économies que devrait permettre de réaliser la solution DIAMOND à hauteur de 500 millions de francs selon ses promoteurs, sont somme toute non négligeables. En tout état de cause, l'importance des écarts dans les chiffres produits par les uns et les autres impose que le groupe de travail débouche sur des résultats concrets et fiables.

M. Pierre POINTU a ensuite estimé que les solutions doivent être évaluées selon une méthodologie commune et incontestable, en mesurant leur impact scientifique mais aussi économique, à la fois sur un plan local et sur le plan national.

La question du financement de l'installation a ultérieurement été évoquée. Après avoir rappelé que, grâce à des dispositions fiscales adéquates, l'industrie américaine participe à la construction de lignes de lumière, **M. Yves PETROFF** a insisté sur l'urgence de remplacer le LURE.

Pour **M. Gilles COHEN-TANNOUJJI**, les progrès faits à l'ESRF sur les technologies des synchrotrons démontrent que ces équipements peuvent être optimisés et conçus à l'échelon national. Ce synchrotron remarquable semble en définitive la seule installation internationale.

Compte tenu de l'augmentation des besoins en rayonnement synchrotron, c'est bien au niveau national qu'il faut agir.

III –Audition de l'Intersyndicale du LURE et de M. Vincent MIKOL, Directeur de recherche Aventis – mercredi 12 janvier 2000

Après avoir souhaité la bienvenue aux membres de l'Intersyndicale du LURE, **M. Christian CUVILLIEZ, Député**, a rappelé que l'objet de son rapport avec M. René TRÉGOUËT, Sénateur, est d'examiner les conditions d'implantation en France d'un nouveau synchrotron, suite à la décision du ministre en charge de la recherche de ne pas mettre en œuvre le projet SOLEIL. Les auditions ont pour but de recueillir l'avis de la communauté scientifique.

Au point où en sont les travaux du groupe de travail, l'utilité du rayonnement synchrotron semble démontrée. Il reste à évaluer les conditions économiques et politiques de la mise en place de ressources additionnelles dans ce domaine.

A cet égard, on peut se demander si ces moyens nouveaux doivent être fournis par un ou deux nouveaux équipements, avec, comme possibilité envisageable dans ce dernier cas, la construction d'une nouvelle machine en France et d'une autre au Royaume Uni.

Au nom de l'Intersyndicale du LURE, **M. Pierre LEBASQUE** s'est attaché à préciser que le LURE (Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique) ne saurait être assimilé à une " *usine à photons* ", c'est-à-dire à un simple fournisseur de temps de faisceau et d'instrumentation. Un laboratoire de rayonnement synchrotron ne peut non plus être remplacé par des lignes et du temps de faisceau accessibles dans un pays ou dans un autre, ainsi que le prévoit le véritable plan de dispersion prôné par le Directeur de la recherche. Il s'agit au contraire d'un ensemble indissociable d'équipements et d'équipes de recherche qui prennent en charge un éventail de missions diversifiées.

La première de celles-ci est bien entendu la production de rayonnement synchrotron, ce qui inclut la construction d'installations ainsi que le développement et la gestion de celles-ci. La deuxième mission

correspond à l'accueil et à l'assistance fournie à un grand nombre de chercheurs extérieurs, 625 laboratoires venant utiliser cette source pour un nombre total de 1800 "runs" individuels par an. La troisième mission du LURE est la recherche dans divers domaines scientifiques qui n'appartiennent pas tous à la physique.

La présence au sein du LURE d'équipes compétentes permet un accueil actif et une assistance à forte valeur ajoutée aux utilisateurs externes. En effet, les travaux de développement de la source, de construction de lignes de lumière adaptées aux besoins et de mise au point des dispositifs expérimentaux assurés en interne, l'évolution et l'adaptation des modes d'exploitation des sources pour répondre aux besoins des scientifiques, témoignent d'une compétence exceptionnelle des personnels en matière de technologies des synchrotrons. Cette expertise assure la meilleure assistance aux utilisateurs et c'est elle qui a permis d'élaborer une proposition de nouvelle source, SOLEIL, destinée à répondre aux besoins de toutes les communautés utilisatrices. La compétence des équipes du LURE a aussi permis de réduire les coûts et les délais de mise au point du projet SOLEIL.

SOLEIL n'est pas un nouveau laboratoire à construire "*quelque part*". C'est une nouvelle source destinée à remplacer les sources actuelles du laboratoire LURE, pour lui permettre de continuer d'assurer sa mission, avec des performances du meilleur niveau.

Par ailleurs, la présence au LURE de chercheurs de toutes les disciplines favorise les échanges de connaissances scientifiques et le transfert de méthodes expérimentales de pointe à l'ensemble des laboratoires utilisateurs. Sur ce dernier point, un débat s'est engagé entre M. LEBASQUE et M. Georges CHARPAK sur la possibilité effective pour un pays de construire un synchrotron, sans expérience, sans connaissances techniques préalables et sur un site entièrement nouveau. Une question qui s'est posée à cet égard, selon **M. CHARPAK**, est de savoir s'il eût été pertinent d'implanter SOLEIL, au cas où sa construction avait été décidée, dans une région française autre que l'Île de France où se trouve le LURE ou que Rhône-Alpes où figure l'ESRF.

Ainsi que l'a observé **M. LEBASQUE**, on constate effectivement que tous les pays qui disposent de synchrotrons de deuxième génération ont choisi d'ériger un nouvel équipement de 3^{ème} génération à proximité immédiate du précédent. Les pays nouvellement possesseurs de synchrotrons comme la Suisse, qui n'avait pas d'antécédents dans ce domaine, s'appuient quant à eux sur leur expertise en physique des particules, en particulier dans le domaine des accélérateurs. Ainsi, dans

le cas de la Confédération helvétique, le synchrotron SLS en construction se trouve au sein du Paul Scherrer Institut à Villigen, à côté de la source de protons existante.

Ainsi que l'ont souligné **Mme Dominique CHANDESRIS** et **M. Vincent MIKOL**, d'une part l'expérience acquise dans un tel domaine de pointe, et, d'autre part, la construction d'un nouveau synchrotron sur un site qui en possède déjà un, ne sont certes pas obligatoires mais permettent de diminuer les coûts.

M. LEBASQUE a alors poursuivi son exposé en précisant que le LURE comprend 400 personnes dont 300 permanents et 100 Post Doc, thésards et chercheurs associés. Les 300 personnels permanents se composent, en ce qui le concerne, de 80 chercheurs et 220 personnels ITA.

Ce qui fait la force d'un laboratoire de rayonnement synchrotron, ce n'est pas tant ses infrastructures matérielles que la somme des compétences humaines qui y est rassemblée et organisée autour des sources de rayonnement.

Les personnels du LURE, qui présentent une très grande diversité de métiers, se répartissent dans de petites équipes scientifiques et techniques très spécialisées.

Dans l'examen du pôle de compétences que constitue le LURE, le cas des personnels ITA mérite d'être traité en détail. Pour la plupart, ces derniers ont en effet, en sus de leur formation de base, des qualifications très spécifiques, qui ne peuvent s'acquérir que sur le site, aucune formation appliquée à ce domaine n'étant assurée dans l'enseignement supérieur. Compte tenu de la sophistication des techniques mises en œuvre, il faut au total de 3 à 10 années pour qu'un ingénieur ou technicien atteigne son efficacité complète.

Toute fermeture, délocalisation ou dévaluation du LURE qui ne seraient pas compensées par la construction sur le site d'une nouvelle source, d'une part entraînerait une perte de compétences impossible à reconstituer plus tard ou ailleurs, et, d'autre part, aurait un coût financier et humain considérable.

Le LURE est au centre d'un réseau scientifique issu de 25 ans d'efforts. Autour du noyau des permanents du LURE, gravitent en effet d'une part les chercheurs associés sans qui le LURE ne pourrait en réalité fonctionner, et, d'autre part les utilisateurs fréquents qui appartiennent le plus souvent à des laboratoires de l'Île-de-France. Le troisième cercle

est, lui constitué des utilisateurs ponctuels, les plus nombreux, qui apportent leurs échantillons et effectuent, avec l'assistance des personnels permanents. Les scientifiques des trois cercles ont le même accès aux sources du LURE, à travers l'évaluation des projets de recherche et leur sélection par les Comités de programmes formés uniquement de scientifiques n'appartenant pas au LURE.

Vouloir remplacer le LURE par des accès à des lignes et des temps de faisceaux au Royaume Uni ou d'autres pays européens, c'est détruire ces liens entre chercheurs nationaux, le priver de son pôle de compétences et disperser cette communauté. Une délocalisation de SOLEIL, coupé de LURE et hors de l'Ile-de-France, aurait à peu près le même effet.

Sur la question de l'importance des liens d'une communauté scientifique avoisinante avec les équipes d'un synchrotron, **M. Jean GALLOT** a cité son expérience à la tête de l'Unité de Recherche Associée au CNRS URA 808 de l'université de Rouen. De fait, la relation de proximité des utilisateurs avec les exploitants d'un synchrotron est essentielle pour apprécier la faisabilité d'une manipulation, pour en préparer la réalisation et en exploiter les résultats.

Par ailleurs, **pour M. Pierre LEBASQUE**, le rôle irremplaçable du LURE dans la formation des jeunes à l'utilisation du rayonnement synchrotron et aux techniques associées, ainsi que dans les divers domaines scientifiques concernés, serait également mis en cause, au détriment de l'Université Paris Sud et de la région Ile-de-France bien évidemment mais aussi des autres régions.

Il est à noter de surcroît que le LURE est un membre actif du réseau européen des centres de rayonnement synchrotron.

En Europe, seul l'ESRF a été construit et est exploité dans le cadre d'un contrat international entre pays européens. Tous les autres sont des centres nationaux de répondant aux besoins de leur communauté nationale et inscrits dans des collaborations européennes.

A ce titre, le LURE reçoit annuellement environ 5 millions de francs de l'Union européenne dans le cadre de contrats d'accès réciproque aux grands équipements nationaux. Les autres ressources du LURE sont d'une part une subvention ordinaire des tutelles (CEA, CNRS et MENRT) d'environ 37 millions de francs par an et d'autre part les ressources provenant de contrats de recherche européens. LURE intègre déjà une ligne franco-espagnole et une ligne franco-suisse. Il

organise de nombreuses collaborations, échanges, doctorats avec les laboratoires et universités européens.

L'existence de LURE, en tant que centre de rayonnement synchrotron permet des coopérations scientifiques d'égal à égal entre les utilisateurs français et ceux des autres pays. Ce ne serait évidemment plus le cas sans le LURE et sans SOLEIL.

M. Marc SIMON a alors précisé l'information donnée aux Rapporteurs sur les travaux scientifiques réalisés au LURE. Globalement, le nombre d'utilisateurs individuels s'est élevé à 1768 en 1998, pour 900 projets animés par 600 laboratoires répartis sur tout le territoire national et à l'étranger.

On estime à cet égard que le tiers de la recherche effectuée au LURE est le fait d'équipes comportant au moins un scientifique étranger.

Les travaux scientifiques conduits par les équipes du LURE pour leur propre compte, y compris en collaboration avec des équipes d'autres laboratoires, représentent quant à eux 20 % environ du total.

Un ensemble très complet de disciplines sont concernées par le rayonnement synchrotron du LURE : la biologie représente 23 % des projets, la diffusion-diffraction 19 %, la chimie 20 %, la physique du solide 11%, les études de surface 11 %. Nul doute que la présence du LURE dans le triangle Orsay, Saclay, Palaiseau permet de tirer le meilleur parti des synchrotrons DCI et Super ACO, du fait de la densité locale en laboratoires de recherche de haut niveau.

M. Pierre POINTU a alors estimé que l'accès au LURE étant gratuit pour les travaux de recherche publiables, la mise à disposition d'un tel équipement équivaut à une "*subvention de fonctionnement en nature*". Le ministère de la recherche soutient souvent qu'en finançant un grand instrument, les laboratoires sont privés de crédits de fonctionnement à due concurrence. En réalité, le cas d'un synchrotron est totalement opposé à celui d'un grand accélérateur de recherche fondamental comme celui du CERN. Le LURE travaille avec quantité de laboratoires en prenant à sa charge tous leurs frais d'accès aux lignes de lumière. Il s'agit donc bien d'une "*subvention indirecte*".

Convaincu que la plupart des utilisateurs occasionnels du LURE répartis dans 600 laboratoires sont déterminés, en réalité, à aller n'importe où, en France ou en Europe, pour trouver un bon faisceau, **M. Georges CHARPAK** a remarqué que le LURE dispose de bons arguments pour les attirer.

Cette question est apparue fondamentale à **Mme CHANDESRIS**. Peut-on comparer l'accès sporadique à des lignes de lumière situées au Royaume Uni, en Suisse ou en Italie, comme cela est prévu dans le cadre du projet du ministère, avec la prestation complète offerte au LURE, où le chercheur est encadré et conseillé à chacune des étapes de sa démarche, depuis la conception de celle-ci jusqu'à l'exploitation des résultats en passant par la réalisation pratique des expériences ? La réponse de Mme CHANDESRIS est négative, en particulier parce que le LURE est aussi un "*laboratoire d'organismes*", une structure commune au CEA et au CNRS, que les personnels du LURE ont à cœur de servir.

M. Georges CHARPAK a alors fait connaître que, selon ses informations, le projet du ministère ne vise en aucune façon à supprimer le LURE mais à le doter des moyens d'un laboratoire national, afin qu'il joue un rôle d'encadrement des équipes de recherche et de facilitateur pour l'accès aux sources de rayonnement les plus modernes, où qu'elles se trouvent, en tant que "*laboratoire d'appui*".

A ce propos, **M. Pierre LEBASQUE** a fait valoir que le Directeur de la Recherche a, au contraire, demandé, par lettre datée du 2 décembre 1999, l'inscription de la discussion d'un plan social dans la perspective de la fermeture du LURE, à l'ordre du jour du conseil d'administration de ce dernier prévu pour le 1^{er} février 2000.

Sur la question de l'importance des liens d'une communauté scientifique avoisinante avec les équipes d'un synchrotron, **M. Jean GALLOT** a cité son expérience à la tête du laboratoire de microscopie ionique de l'université de Rouen.

De fait, la relation de proximité des utilisateurs avec les exploitants d'un synchrotron est essentielle pour apprécier la faisabilité d'une manipulation, pour en préparer la réalisation et en exploiter les résultats.

Mais au-delà de cet avantage incontestable que procure la proximité et auquel on renoncerait en allant faire des expérimentations à l'étranger, il faudrait, pour que cette solution soit envisageable, avoir la garantie d'un accès effectif de nos chercheurs à des lignes de lumière disponibles. Or l'existence de lignes de lumière libres d'accès en Europe est un mythe.

M. Georges CHARPAK a estimé que ce point devait être éclairci en priorité par le groupe de travail. Il est indispensable que la disponibilité effective de faisceaux en Europe soit démontrée. Si elle ne l'est pas, le

groupe de travail, répondant à sa vocation de " *comité antimythe* " devra le dire en toute clarté.

M. LEBASQUE, citant la position de la Table ronde européenne sur le rayonnement synchrotron, s'est déclaré en accord avec le point de vue de M. Jean GALLOT. Selon un recensement effectué en décembre 1999 à l'occasion du Colloque des Utilisateurs du LURE, réunion à laquelle étaient présents les directeurs des centres de rayonnement synchrotron de 3^{ème} génération, il est apparu, après l'interrogation des responsables des principaux synchrotrons européens, que seule la Suisse pourrait effectivement attribuer deux lignes à des utilisateurs extérieurs mais ceci seulement pour une durée contractuelle maximale de deux fois quatre années.

En réalité, pour répondre aux besoins européens en rayonnement synchrotron, ce sont deux sources de 3^{ème} génération qu'il faut aujourd'hui construire, l'une en France et l'autre au Royaume Uni. Avec la mise en œuvre concomitante de SOLEIL et de DIAMOND, l'Europe ne connaîtrait pas de surcapacité et ne disposerait que de l'équivalent des sources vieillissantes de 2^{ème} génération du LURE et du synchrotron SRS de Daresbury.

M. Roger FOURME a confirmé le retard actuel de la France et du Royaume Uni en matière de rayonnement synchrotron. Dans le domaine spécifique de la bio cristallographie, les sept premiers pays du palmarès du secteur ont une installation nationale de 3^{ème} génération, la France et le Royaume Uni mis à part. Une décision de lancement de nouveaux équipement est donc à prendre sans délai, sauf à accroître un retard critique dans un secteur important de la compétition internationale. Sur la question des liens, grâce à la proximité, entre les responsables des outils et les chercheurs utilisateurs, M. Roger FOURME a noté l'existence à l'ESRF d'un " *continuum* " entre la machine " *source* ", les lignes de lumière et les activités scientifiques s'y déroulant.

On ne saurait, de fait, considérer un synchrotron comme un simple " *vélodrome à électrons* ". Le recours à des lignes extérieures, réparties entre plusieurs machines, ne permettrait pas une cohérence d'ensemble et une adaptation continue des dispositifs expérimentaux au bénéfice des chercheurs.

Réciproquement, des relations épisodiques des gestionnaires d'un synchrotron avec les chercheurs mais aussi l'appropriation de certaines lignes de lumière par des groupes d'utilisateurs, comme des universités et des entreprises industrielles sur l'APS de Chicago, empêchent toute coordination du développement de l'instrumentation. C'est pourquoi

l'intégration de tous les maillons à l'instar de ce qui est réalisé à l'ESRF apparaît comme la solution à reproduire pour un futur synchrotron.

S'agissant de l'apport d'un synchrotron à son environnement industriel, **M. Gilles COHEN- TANNOUDJI** a souligné qu'il se fait aussi par la voie des thèses effectuées sur place pour le compte des entreprises. Le nombre de 35 thésards présents en permanence dans les effectifs du LURE et le chiffre de 200 thèses soutenues, chaque année, par des utilisateurs ponctuels du LURE, est une indication intéressante sur la diffusion de savoirs et de savoir-faire par cette installation mais mériteraient d'être complétés par une évaluation du nombre annuel d'embauches d'anciens du LURE par les entreprises.

L'historique du projet SOLEIL établi par **Mme CHANDESRIS** a permis de mieux connaître la genèse du projet et de constater sa validation par de multiples instances.

En 1989, un colloque des utilisateurs du LURE initialise la réflexion sur les caractéristiques souhaitables d'une nouvelle source de rayonnement synchrotron. Débute alors une décennie d'études et d'expertises qui, toutes, les unes après les autres, jugeront positivement le projet. En 1993, l'argumentaire scientifique relatif au projet ainsi qu'une première étude technique sont rendus publics. En 1994, un comité d'experts indépendants conclut à la nécessité de construire SOLEIL avec les meilleures performances possibles. En 1996, le ministère de la recherche, le CEA et le CNRS mettent en place une équipe chargée d'établir un avant-projet détaillé de synchrotron SOLEIL, avant-projet achevé et rendu public en avril 1999. L'intérêt du projet SOLEIL et ses principales spécifications sont validées en 1999 par un audit international, réalisé par quatre chercheurs de haut niveau, provenant de quatre pays européens différents.

L'avis positif donné sur SOLEIL à plusieurs reprises et par des instances différentes, s'explique en premier lieu par la qualité de l'avant-projet qui elle-même résulte de l'expertise accumulée en France et en particulier au LURE sur les synchrotrons. En deuxième lieu, il s'explique par la multiplication des applications du rayonnement synchrotron dans des domaines de plus en plus nombreux.

A cet égard, Mme CHANDESRIS a cité la protection de l'environnement avec la détection de traces de polluants et la mise en évidence de leur forme chimique, les sciences de la Terre où la structure des matériaux peut être étudiée dans des conditions de pression et de température extrêmes correspondant à celle régnant dans le manteau inférieur et dans le noyau du globe terrestre, ainsi que l'étude des propriétés

magnétiques des différentes composantes des supports d'enregistrement de données informatiques.

S'il fallait toutefois identifier le domaine dans lequel les applications du rayonnement synchrotron connaissent une croissance explosive, ce serait le domaine de la biologie structurale.

M. Roger FOURME a ainsi indiqué que la détermination des structures tridimensionnelles des macromolécules constitue une voie essentielle de la biologie moderne. La raison fondamentale en est que les macromolécules fonctionnent d'une certaine manière parce qu'elles ont une certaine forme : il s'agit de "*micromachines*" dont il est possible de bloquer l'action en bloquant le fonctionnement par la greffe de molécules additionnelles. Cette méthode nécessite de connaître non seulement la composition chimique détaillée de la macromolécule mais aussi sa structure dans l'espace.

La contribution du LURE à la mise au point des méthodes expérimentales d'analyse structurale des macromolécules est très importante. Les travaux correspondants ont débuté en 1976 et c'est au LURE qu'a été réalisée la première résolution de structure d'une protéine inconnue par la méthode MAD, actuellement très utilisée dans les centres de rayonnement synchrotron. Aujourd'hui, nombreuses sont les méthodes qui, notamment dans le domaine de la biocristallographie, ont été mises au point au LURE et qui sont utilisées à l'étranger.

L'acquis considérable du LURE dans le domaine de la biologie structurale constitue pour la France un atout essentiel dans la course qui s'est engagée dans tous les pays pour la résolution de la structure des protéines. A cet égard, il existe 90 projets dans ce domaine déposés au LURE en 1999.

Après que le séquençage de plusieurs génomes a été mené à bien, la biologie entre dans ce que l'on peut appeler l'ère post génomique, qui est celle de la génomique structurale. L'analyse tridimensionnelle de la structure des protéines, grâce au rayonnement synchrotron et à des outils d'exploitation des résultats, constitue d'ores et déjà une "*nouvelle industrie*" dont on peut prévoir qu'elle s'exercera dans des "*instituts spécialisés*".

Ainsi que l'a estimé en 1999 Max PERUTZ, Prix Nobel, "*Le déchiffrement du génome humain, dans lequel les scientifiques français ont joué un rôle de premier plan, devrait être achevé l'an prochain. Il localisera et fournira la séquence de la majorité de ses 80 000 à 100 000 gènes mais il ne dira rien des fonctions d'une large fraction d'entre eux. Afin*

d'élucider ces fonctions, les scientifiques américains ont mis sur pied un programme concerté de grande envergure pour déterminer, par cristallographie des rayons X à l'aide du rayonnement synchrotron, la structure des protéines codées par des milliers de nouveaux gènes choisis parmi les plus mystérieux. Si les scientifiques français veulent être à égalité avec leurs collègues américains, ils ont besoin d'un accès aisé à une source puissante de rayonnement synchrotron qui serait idéalement située non loin du Centre de Séquençage d'Evry. Si le projet SOLEIL est abandonné, ils resteront à la traîne de cette grande entreprise ".

S'agissant de la biocristallographie, quels sont ses besoins en rayonnement synchrotron ? Tels qu'on les évalue à l'heure actuelle, ils sont de trois sections droites d'un synchrotron de 3^{ème} génération, accueillant 9 montages expérimentaux, pour cette seule discipline, outre des centres tels que l'ESRF qui sont utilisés par la communauté française.

Au reste, il faut remarquer que la recherche universitaire française n'est pas inactive pour entamer le travail systématique de résolution des structures de protéines qui constitue le nouveau chantier de l'ère postgénomique.

Quatre projets sont en cours d'élaboration à l'université Paris Sud (Orsay-Gif-Saclay) et aux universités de Strasbourg, de Grenoble et de Marseille. Pour effectuer ce travail systématique, un instrument à temps plein sur une ligne à onduleur (section droite) sera nécessaire en accès quotidien pour le seul centre de Paris Su. A l'instar de ce qui est fait aux Etats-Unis, où les cinq projets en cours sont tous coordonnés avec un synchrotron, et ainsi que cela va être fait au Royaume Uni, où le Wellcome Trust a pour but de créer un complexe de laboratoires autour de DIAMOND, il serait particulièrement indiqué que des antennes des quatre projets se créent autour du projet SOLEIL lui-même implanté dans l'Essonne.

M. René TRÉGOUËT s'est alors interrogé sur le point de savoir si les besoins en croissance explosive de la biologie structurale étaient de nature à modifier l'utilisation globale des synchrotrons de 3^{ème} génération, en diminuant la part des autres disciplines dans leurs applications.

Selon **M. Roger FOURME**, cette évolution ne devra pas se produire car il est indispensable que toutes les disciplines aient leur place sur un synchrotron.

La croissance des besoins de la biocristallographie est certes rapide puisque, de la situation actuelle avec l'équivalent d'une section droite, les prévisions sont passées, en deux ans, d'un besoin d'une ligne supplémentaire à deux lignes. Toutefois le nombre total de 3 sections droites dédiées à la biocristallographie dans les années à venir semble désormais stable, d'autant qu'il faut ajouter à ces ressources les possibilités d'accès à l'ESRF.

M. Georges CHARPAK s'est alors enquis de savoir si l'enveloppe de 7 lignes permanentes sur DIAMOND négociées par le ministère de la recherche pourrait pourvoir aux besoins de la cristallographie des protéines sans reléguer les autres disciplines à la portion congrue.

Tant **M. Roger FOURME** que **M. Vincent MIKOL** ont répondu par la négative. Il est en effet envisageable mais il serait difficile à faire accepter par l'ensemble de la communauté scientifique que 3 des 7 lignes de DIAMOND soient réservées à la seule biocristallographie.

Pour autant, précisément, peut-on espérer, comme l'a demandé **M. Georges CHARPAK**, que le Wellcome Trust qui devrait disposer de 7 lignes privatives sur DIAMOND, en ouvre l'accès à des équipes de recherche extérieures au noyau de celles qui bénéficient de son soutien, voire à une recherche industrielle susceptible de concurrencer le laboratoire Glaxo-Wellcome avec lequel il a des liens ? En tout état de cause, il apparaît nécessaire de poser cette question et surtout d'obtenir une réponse claire des responsables de cette fondation.

De fait, la croissance des besoins en rayonnement synchrotron de la biologie structurale est avérée. Selon **M. Vincent MIKOL**, elle représente d'ores et déjà 30 % des temps d'accès aux machines de 3^{ème} génération et l'on prévoit aux Etats-Unis qu'elle passe rapidement à 50 %. Certains experts anticipent un doublement voire un triplement dans les 3 à 4 ans des temps de faisceau pour la biocristallographie. Aventis prévoit un doublement de ses besoins dans les deux ans. D'ailleurs si le Wellcome Trust est partie prenante au projet DIAMOND, c'est essentiellement pour y développer la biologie structurale. Et comme l'a souligné **M. Roger FOURME**, d'autres organismes, aux Etats-Unis en particulier, s'engouffrent dans cette voie en y investissant des budgets somme toute " *effrayants* ".

Dès lors, comme l'a observé **M. Jean GALLOT**, il est nécessaire de trouver des solutions au financement d'un nouveau synchrotron.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur a estimé que tous les aspects du dossier doivent être traités dans le rapport de l'Office et en

particulier la fiscalité relative aux investissements en recherche et développement. A cet égard, les "charity trusts" britanniques devront être analysés sous toutes leurs facettes, notamment en ce qui concerne leurs processus de décision, leur fiscalité et celle des dons qui leur sont faits. Peut-être faudra-t-il alors recommander des modifications de notre droit des fondations à vocation scientifique.

La parole a alors été donnée à **M. Vincent MIKOL**, directeur du département de biologie structurale et modélisation moléculaire chez Aventis Pharma, firme pharmaceutique résultant de la fusion de Rhône Poulenc Rorer et de Hoechst Marion Roussel.

*

Aventis est l'un des leaders mondiaux des sciences de la vie, avec deux cœurs de métiers : la pharmacie et les produits pour l'agriculture. Le chiffre d'affaires pro forma du groupe s'est élevé à 21 milliards d'euros en 1998. Les dépenses totales de recherche et développement du groupe ont atteint 17 % de son chiffre d'affaires cette même année, soit 2,8 milliards d'euros. Aventis emploie 90 000 personnes réparties dans 150 pays.

Aventis, comme tous les laboratoires pharmaceutiques, doit actuellement faire face à une révolution dans les méthodes de mise au point des médicaments. Cette révolution est celle de la génomique.

Le processus de développement d'une molécule active, c'est-à-dire d'un médicament, commence avec l'identification du constituant de la cellule qui est responsable de la maladie considérée. En moyenne, la dépense de recherche et développement correspondant à la mise sur le marché d'un nouveau médicament s'élève à 400 millions d'euros.

Or deux évolutions fondamentales bouleversent ce processus de développement. La première est d'ordre juridique, avec la brevetabilité du vivant. La seconde est d'ordre scientifique, avec le décryptage du génome, qui permettra de faire le lien entre un ou plusieurs gènes particuliers et une maladie spécifique

La Directive 98/44/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 juillet 1998 relative à la protection juridique des inventions biotechnologiques dispose dans son article 5 que :

" 1. Le corps humain, aux différents stades de sa constitution et de son développement, ainsi que la simple découverte d'un de ses éléments, y compris la

séquence ou la séquence partielle d'un gène, ne peuvent constituer des inventions brevetables.

" 2. Un élément isolé du corps humain ou autrement produit par un procédé technique, y compris la séquence ou la séquence partielle d'un gène, peut constituer une invention brevetable, même si la structure de cet élément est identique à celle d'un élément naturel.

" 3. L'application industrielle d'une séquence ou d'une séquence partielle d'un gène doit être concrètement exposée dans la demande d'un brevet. "

Ainsi que l'a indiqué **M. René TRÉGOUËT**, la directive européenne 98/44/CE du 6 juillet 1998 n'est pas encore transposée en droit interne français, et de nombreux débats existent en France tant sur le plan de l'éthique que sur le plan juridique, différentes dispositions de la directive apparaissant au demeurant comme contradictoires.

Toutefois, pour **M. Vincent MIKOL**, les enjeux sont désormais clairement posés. La brevetabilité du vivant est courante aux Etats-Unis et les pays membres de l'Union européenne ont l'obligation de transposer cette directive avant le 30 juillet 2000. Au reste, il ne fait aucun doute pour les entreprises privées que la brevetabilité des gènes sera la règle dès cette année et qu'elle les oblige à se lancer sans délai dans la course.

Ainsi donc, selon la directive n° 98/44/CE, un gène sera brevetable si l'on peut prouver qu'une utilisation industrielle de ses propriétés est possible. Comment administrer cette preuve ? En mettant par exemple en évidence une fonction exercée par ce gène. La brevetabilité du gène s'exercera sur la fonction démontrée et non pas sur l'ensemble de ses fonctions, qui peuvent être multiples et liées à d'autres gènes.

L'identification d'un gène et de sa fonction s'opère principalement par le criblage d'un grand nombre de molécules.

Les protéines revêtent un intérêt central, à cet égard, en tant que macromolécules intervenant dans tous les processus biologiques. Agents essentiels de la structure et du fonctionnement des cellules, les protéines participent aussi à la synthèse de l'ADN et au contrôle de l'information génétique nécessaires pour la formation d'ARN et d'autres protéines.

L'objet de nombreuses études est donc l'identification de la structure de protéines, suivie de la sélection des molécules qui, leur étant greffées, peuvent bloquer leur fonctionnement. C'est là qu'intervient le rayonnement synchrotron, dont c'est l'utilisation principale pour Aventis, au titre de "*l'optimisation des pistes pour des têtes de série chimiques*".

De fait, le rayonnement synchrotron a joué un rôle essentiel dans la mise au point de l'antiprotéase du VIH, dans celle de médicaments contre le glaucome, l'hypertension, la grippe ou le cancer.

C'est pourquoi le recours au synchrotron s'est établi à une trentaine de "*runs*" payants en 1999, pour une dépense unitaire moyenne de 24 000 francs par "*run*", soit un budget total de 750 000 francs. 90 % de ces "*runs*" ont concerné la biologie structurale et 10 % la formulation des médicaments.

En réponse à une question de **M. Gilles COHEN-TANNOUDJI** sur l'ensemble des méthodes utilisées pour déterminer les structures de macromolécules, **M. Vincent MIKOL** a précisé que la structure du prion a été élucidée par RMN (résonance magnétique nucléaire). Bien que la RMN et la cristallographie rayons X produits par un synchrotron présentent des complémentarités, pour sa part Aventis a clairement fait le choix de cette dernière technique. La RMN apparaît en effet comme une méthode plus lente, nécessitant des échantillons marqués de taille limitée et donc, finalement d'une productivité plus faible. Si la RMN est impuissante pour la résolution des structures de molécules d'une masse moléculaire supérieure à 30 000, elle présente toutefois un premier avantage de ne pas exiger que le composé étudié soit sous forme cristallisée et un second avantage, qui est de permettre aisément l'étude de phénomènes dynamiques, ainsi que l'a remarqué **M. Roger FOURME**.

En tout état de cause, **M. Gilles COHEN-TANNOUDJI**, constatant que les instruments de RMN sont des équipements mi-lourds, a émis l'idée d'une complémentarité entre les deux techniques, qui pourrait prendre la forme d'un laboratoire mixte public-privé doté de différents types de moyens, RMN et synchrotron. **M. Vincent MIKOL** a fait observer à cet égard que la détermination des structures tridimensionnelles par RMN n'est pas stratégique pour la grande majorité des laboratoires pharmaceutiques, au contraire de la cristallographie à rayons X pour laquelle l'industrie serait prête à investir. Au reste, un consortium européen en cours de création sur la génomique structurale et rassemblant Novartis, Aventis et Glaxo-Wellcome, notamment, a explicitement exclu la RMN des techniques à mettre en œuvre.

En définitive, il faut noter que la totalité des expériences conduites par Aventis sur un synchrotron se sont déroulées à l'ESRF, parce qu'il s'agit d'une machine de 3^{ème} génération. Aventis n'est plus client du LURE en raison de son obsolescence.

M. Vincent MIKOL a également souligné, a contrario, le caractère attractif d'un grand équipement à la pointe de la technologie comme l'ESRF. Selon toute probabilité, le consortium européen sur la génomique structurale s'établira à Grenoble, en raison notamment de la présence de l'ESRF. La qualité du tissu scientifique local dans les décisions d'implantation de laboratoires de recherche est aujourd'hui fondamentale. Il ne fait pas de doute que si les équipes de recherche de grands groupes pharmaceutiques sur la génomique sont restées en France, c'est en raison de la présence du Génopôle d'Evry. Et s'il devait se produire à l'avenir une saturation de l'ESRF, Aventis délocaliserait sans état d'âme ses moyens de recherche en biologie structurale actuellement répartis entre Paris et Francfort.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI est, à ce moment de la réunion, revenu sur l'utilisation du rayonnement synchrotron par l'industrie afin d'examiner dans quelle mesure les groupes privés pourraient envisager de participer au financement d'un nouvel équipement.

Pour **M. Vincent MIKOL**, la difficulté majeure à résoudre est celle de la fiscalité. Si, comme aux Etats-Unis, un crédit d'impôt était mis en place pour les investissements de ce type, il ne fait guère de doute qu'Aventis y participerait.

M. Georges CHARPAK a ainsi résumé la problématique du sujet en indiquant qu'il restait à proposer une mesure fiscale telle que "*les utilisateurs payent avec plaisir*".

Selon **M. Vincent MIKOL**, une autre dimension ne doit toutefois pas être sous-estimée, celle de la localisation. La meilleure solution pour un synchrotron français serait sans doute de le construire à proximité des grands laboratoires de génomique. S'il devait y avoir des lignes de lumière accessibles en Grande-Bretagne dans le cadre du projet DIAMOND, l'implantation à Oxford serait préférable à celle de Manchester-Daresbury.

Abordant ensuite le sujet important des nanotechnologies en tant qu'ensemble d'outils à l'échelle moléculaire, **M. René TREGOUET, Sénateur, rapporteur**, a questionné les participants sur la contribution éventuelle du rayonnement synchrotron au développement de ce nouveau domaine.

M. Jean JERPHANION a estimé qu'effectivement le rayonnement synchrotron est un outil performant pour l'investigation des substrats moléculaires et pour la conception des microsystèmes. Un parallèle peut toutefois être fait avec l'emploi du rayonnement synchrotron en microélectronique, où cet outil est extrêmement précieux pour les études mais ne figure pas, contrairement aux attentes, dans la panoplie des outils industriels. Selon toute probabilité, il devrait en être ainsi pour les nanotechnologies.

M. Pierre POINTU a alors repris l'interrogation sur la place que l'industrie devrait occuper dans tout projet de nouveau synchrotron. A ce stade de l'analyse, il semble acquis que les besoins en temps de faisceau sont en croissance forte et durable pour la génomique et la microélectronique, en particulier pour le passage à la microélectronique quantique ou "*microélectronique à un électron*". Dans ces deux domaines, ce sont les connaissances fondamentales qui limitent le développement économique. Les synchrotrons contribueront d'une manière sans doute décisive au développement d'activités économiques. Or, quels sont les modes d'accès à ces grands instruments ?

Au vrai, il y en a deux, correspondant à deux situations extrêmes : d'un côté l'accès payant pour des recherches dites "*propriétaires*" non publiées, et, de l'autre, l'accès gratuit pour les travaux publiés de recherche fondamentale. Cette situation doit être replacée dans le cadre de l'action du ministre chargé de la recherche qui s'attaque au manque de couplage entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée et à l'insuffisance des rapports contractuels entre les deux.

Ne peut-on pas penser qu'un synchrotron permet de favoriser la coopération entre ces deux mondes dont l'insuffisance est un handicap national. Le ministre agit beaucoup pour le réduire. Une piste est donc à explorer sur ce sujet. Elle met en jeu très directement les conditions d'accès à la machine et leur maîtrise.

M. Pierre LEBASQUE a, de ce fait, précisé les modes d'accès de l'industrie aux synchrotrons.

La première modalité d'accès, la plus simple, est celle de l'acquisition d'un temps de faisceau, pour des "*runs*" payants, le degré ultime de la simplicité étant celui où les expériences se font sur des protocoles établis voire, dans certains cas rares, sur des échantillons envoyés par les donneurs d'ordre et traités par les permanents de l'installation.

La deuxième modalité est celle du financement de lignes de lumière par des industriels ou des universités qui se les approprient, généralement dans le cadre de consortiums. Ce cas est relativement fréquent aux Etats-Unis mais rare en Europe. Deux cas seulement y sont observés, une ligne de lumière pour l'industrie microélectronique à l'ESRF de Grenoble et une autre sur le synchrotron allemand ANKA de Karlsruhe.

La troisième modalité de financement d'un synchrotron par l'industrie est celle du financement de la source elle-même. On ne connaît pas d'exemple de ce type, à l'exception du Japon où Mitsubishi aurait sa propre installation à usage privatif. Au vrai, selon M. LEBASQUE, il semble difficile d'imaginer qu'un consortium public-privé assure conjointement le financement de la source proprement dite. On peut se demander en effet si la pérennité de l'équipement ne serait pas menacée par la dépendance vis-à-vis des industriels, principalement s'il s'agissait d'un industriel unique.

M. Vincent MIKOL a ajouté à cet égard qu'il existe, pour la recherche industrielle, des solutions simples pour obtenir du temps de faisceau. La première est celle du " *run* " payant. Une autre solution simple est celle de la collaboration d'un post-doc attaché au site. Une autre solution simple serait sans doute l'investissement dans une ligne de lumière permettant un accès sans délai et sans limite. Les cas intermédiaires, tels que ceux qui existent par exemple à l'ESRF, sont des " *cauchemars* " au niveau de la propriété industrielle, dans la mesure où le plus souvent, il faut l'accord d'un ensemble de pays membres. Evidemment, si la machine considérée était gérée par un ensemble d'organismes de recherche comme le CNRS, l'INSERM et le CEA, par exemple, on peut espérer que ces cas intermédiaires soient traités avec plus de rapidité.

M. Pierre POINTU a poursuivi dans le même sens. L'industrie est de moins en moins encline à investir dans des équipements dans lesquels elle serait immobilisée pour 10 à 20 ans. La tendance est au contraire aux travaux contractuels, au financement du fonctionnement au coup par coup même à prix plus élevés ou tout au plus aux engagements à moyen terme.

Selon **M. Vincent MIKOL**, " *la visibilité de la recherche ne dépasse pas 3 à 4 ans* ". Il y a tout lieu de penser qu'Aventis serait opposé au financement de lignes de lumière, sauf en cas de pénurie manifeste et incontournable. En définitive, Aventis, qui utilise différents postes d'instrumentations pour différents types d'expérimentations, recherche toujours les meilleures performances et est prêt à payer plus cher pour

une utilisation immédiate, tout en étant soucieux d'obtenir un support scientifique.

En réponse à plusieurs questions de **M. René TREGOUET, Sénateur, rapporteur**, portant sur les structures et le fonctionnement du LURE, **M. LEBASQUE** a tout d'abord confirmé que la moyenne d'âge des personnels du LURE est inférieure à la moyenne d'âge des personnels du CNRS, du fait d'une politique de remplacement systématique par le CNRS des personnels du LURE partant en retraite.

S'agissant du temps de fonctionnement annuel des installations, M. LEBASQUE a précisé que le temps de faisceau disponible pour les utilisateurs s'élèvera en 2000 à 4091 heures pour DCI et à 3726 heures pour Super-ACO. Le nombre de jours de fonctionnement est de 5,5 par semaine. Deux arrêts annuels longs sont observés. Le premier, en hiver, est consacré aux gros travaux de maintenance et de jouvence des installations que l'on programme en cette saison, notamment à cause du prix plus élevé de l'électricité pendant cette période de l'année. L'autre arrêt long est de 4 semaines en août, à quoi s'ajoutent quelques semaines d'arrêt pour maintenance, réparties tout au long de l'année. Il est à signaler que, pour les mêmes raisons, l'ESRF observe un arrêt de même durée en hiver. Si au total l'ESRF fonctionne 7 jours sur 7 et atteint une disponibilité annuelle supérieure de plus d'un tiers à celle du LURE, c'est essentiellement parce qu'il est doté des effectifs nécessaires.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI ayant rappelé que l'avant-projet SOLEIL préconise la forme de la société civile comme structure juridique, selon les propos tenus par Mme NENNER (CEA) le 22 décembre devant le groupe de travail, **Mme CHANDESRIS** a rétorqué que plusieurs options sont examinées dans ce document et qu'entre la forme de la société civile et celle du Groupement d'Intérêt Public, "*rien n'a été conclu*". S'agissant de la durée d'utilisation des équipements et notamment de leur fonctionnement en fin de semaine, il s'agit essentiellement d'avoir les effectifs nécessaires. Toutefois, on peut s'interroger sur la rentabilité réelle d'un tel fonctionnement, l'exemple d'autres pays comme les Etats-Unis montrant que l'utilisation est moins efficace les samedi et dimanche, en raison des réticences des personnels.

Pour conclure la réunion, **M. René TREGOUET, Sénateur, rapporteur**, a indiqué que le groupe de travail allait examiner les conditions de fonctionnement des principaux synchrotrons dans le monde, en application de son approche objective du problème. Il a en outre estimé

que la jeunesse des effectifs du LURE augure bien de sa capacité à évoluer dans l'avenir.

M. LEBASQUE a effectivement confirmé que le personnel du LURE est tout à fait prêt à voir évoluer ses conditions de travail si le besoin en est justifié et si c'est dans des "*conditions acceptables*". La souplesse et des horaires de travail atypiques sont déjà habituels au LURE. L'accélérateur linéaire était autrefois exploité 7 jours sur 7, et si les installations du LURE ne le sont pas actuellement, c'est essentiellement en raison d'une situation de sous effectif dans les équipes techniques et dans les équipes de chercheurs permanents chargés d'assurer l'accueil des utilisateurs.

Sur le point des différents statuts juridiques pour un nouveau synchrotron, M. LEBASQUE a observé que si l'ESRF est un établissement à part entière, ce qui résulte logiquement de son caractère multinational, le LURE est un laboratoire commun au CEA, au CNRS et au ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie. A ses yeux, l'articulation du LURE avec ces trois entités est vitale pour assurer un bon service et celui-ci doit rester inséré au sein des organismes publics de recherche. Pour un nouveau synchrotron, le statut d'unité mixte est donc souhaité avec un rattachement fort, plutôt qu'une autonomisation qui diminuerait la cohérence actuelle.

Ainsi pourra continuer le renouvellement progressif de petites équipes rattachées au LURE grâce à une ouverture sur d'autres laboratoires appartenant aux organismes CNRS, CEA et universités. Ce renouvellement indispensable atteint actuellement 10 à 20 personnes par an et ne doit pas être empêché par des "*barrages statutaires*", qui ne manqueraient pas d'apparaître si la forme juridique adoptée pour le nouveau synchrotron était celle d'une société de droit privé. En tout état de cause, "*les personnels doivent rester gérés par leur organisme*".

Au reste, la France connaît à l'heure actuelle deux types de structures juridiques pour la recherche publique. La première catégorie est celle des établissements publics à caractère scientifique et technologique (EPST), à laquelle appartiennent le CNRS, l'INSERM et l'INRA. La deuxième catégorie est celle des établissements à caractère industriel et commercial (EPIC), à laquelle appartient notamment le CEA. "*Il existe donc deux modèles et il n'est pas nécessaire d'aller au-delà*". En toute hypothèse, il n'y aurait aucun avantage à faire cohabiter au sein d'une éventuelle société de droit privé, des personnels à statut détachés et des personnels sous contrat de droit privé.

De plus, pour ce qui concerne l'évaluation de l'activité scientifique des chercheurs et des équipes, il est indispensable de disposer de structures d'évaluation d'un organisme plus large que le seul laboratoire, où, du fait de la pluridisciplinarité, chaque sous-domaine scientifique n'est représenté que par quelques personnes. Au reste l'évaluation externe au laboratoire permet aux chercheurs de rester en contact étroit avec leur communauté scientifique et favorise la mobilité.

A l'ESRF, dont les personnels sont employés sur la base de contrats de droit privé et où la plupart des scientifiques sont sur contrats à durée déterminée, on constate aujourd'hui qu'il est devenu difficile de reclasser au bout de 5 ans, dans les organismes nationaux, les scientifiques spécialisés dans des instrumentations particulières ou dans l'accueil des chercheurs visiteurs.

Pour clore la réunion, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a demandé la confirmation de l'existence de listes d'attente pour l'accès aux faisceaux du LURE. **Mme CHANDESRIS** a fait mention du fait qu'effectivement, un tiers de projets de recherche recourant au rayonnement synchrotron et soumis aux comités de programme du LURE sont rejetés, certains en raison d'un manque de qualité mais la plupart par manque de temps disponible.

M. Christian CUVILLIEZ a également demandé sous quel délai les installations, au demeurant en partie obsolètes, devraient être obligatoirement remplacées.

M. LEBASQUE a alors indiqué que les nouvelles machines de 3^{ème} génération n'en sont qu'à leurs premiers pas. Lorsqu'elles seront totalement opérationnelles, l'arrêt des installations du LURE deviendra vite inévitable pour cause d'obsolescence.

Il a fait aussi remarquer que si le projet SOLEIL n'avait pas connu les retards enregistrés au demeurant sous plusieurs gouvernements différents, et si donc le calendrier de construction prévu au début de l'APD SOLEIL, soit en mai 1996, avait été respecté, SOLEIL aurait pu ouvrir en 2001 et des faisceaux auraient pu être accessibles aux utilisateurs en 2002.

Certains observateurs relèvent une sorte "*d'acharnement thérapeutique*" sur les installations du LURE et il est vrai que si son exploitation continue, c'est "*faute de mieux*", et parce que les besoins d'utilisation du rayonnement synchrotron sont toujours là, en croissance d'ailleurs régulière. Au reste, on observe que certains chercheurs du

LURE sont contraints d'aller sur d'autres machines pour obtenir des faisceaux plus évolués.

Après avoir remercié les participants pour leur précieux concours, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a levé la séance.

IV – Auditions de M. Jochen SCHNEIDER, Directeur du Hasylab (Hambourg), de M. Pierre PAPON, Président de l'OST et de M. René PELLAT, Haut commissaire à l'énergie atomique - mercredi 19 janvier 2000

Réunissant leur groupe de travail en ouverture aux auditions de la semaine, afin de faire le point sur les données déjà engrangées, d'identifier les lacunes de leur information et de parfaire leur méthode, les Rapporteurs ont confié à **M. Pierre POINTU** le soin d'exposer une méthodologie de l'expertise tirée de son expérience.

M. Pierre POINTU a souligné que l'expertise du dossier synchrotron ne peut se borner à un constat des besoins et à l'examen des solutions actuellement en concurrence, mais doit également inclure des propositions de sortie de crise, puisque la situation actuelle créée par le rejet de la solution SOLEIL en est bien une.

Dans la succession des différentes étapes – poser le problème -> chercher ses solutions -> choisir une solution, les dysfonctionnements les plus courants concernent l'identification du problème et le choix de solutions. A cet égard, on peut remarquer que la définition du problème lui-même peut être déplacée en cours de processus, lorsqu'une solution non optimale mais souhaitée dès le départ s'impose pour d'autres raisons que pour résoudre le problème posé.

Les opposants au projet SOLEIL font ainsi valoir que pour le remplacement du LURE, c'est le schéma de solution souhaité par les concepteurs de SOLEIL pour faire avancer la technologie des synchrotrons qui l'a emporté, au détriment de la résolution du problème tel qu'il aurait dû être posé, à savoir une offre de rayonnement synchrotron adaptée aux besoins des utilisateurs. Par ailleurs, faute de s'être mis d'accord au préalable sur la manière de poser le problème, les conflits de solutions deviennent inévitables, relayés souvent par des conflits de personnes. Au vrai, si les critères de choix ne sont pas partagés par les parties prenantes et qu'au surplus ils varient au cours du temps, nul doute que les conflits de solutions deviennent difficiles à résoudre.

Dans le cas présent, à l'instar des partisans de SOLEIL, on peut estimer que si le critère d'une coopération européenne avait figuré, dès 1996, comme priorité au cahier des charges de l'avant-projet détaillé, le profil de SOLEIL en eût été changé.

Dès lors, comment améliorer la situation actuelle ? M. Pierre POINTU a proposé de faire la liste des critères jugés importants par les différentes parties prenantes, scientifiques, ministère et élus, pour le choix des solutions et de les faire valider par les protagonistes.

L'expérience montre qu'un tel processus de validation des critères favorise une "*implication douce*" des protagonistes et aide à rapprocher les points de vue.

La question de l'implantation en France ou à l'étranger semble être le véritable clivage.

Dans les cas difficiles, le processus de choix d'une solution peut être amélioré en formalisant l'analyse et la discussion des solutions en deux étapes, d'une part au regard du degré de satisfaction apporté par les différentes solutions, et d'autre part, au regard de leur difficulté de réalisation.

Un dossier d'expert constitué sur ces bases contribuerait beaucoup à éviter les dérives subjectives, tant pour le travail du groupe que pour les discussions éventuelles avec le ministre et pour le débat public.

M. Georges CHARPAK a poursuivi cette réflexion en indiquant que face à une avalanche de données, il est indispensable que les "*conditions aux limites*" soient bien posées.

En particulier, il est indispensable de savoir à quel point l'investissement correspondant à un synchrotron, dont le montant fait au demeurant l'objet d'estimations divergentes, est contraignant pour le budget de la recherche. On doit également savoir si la décision de construire un nouvel équipement, qui repose en bonne partie sur la demande de la biologie en rayonnement synchrotron, n'est pas susceptible d'assécher les ressources budgétaires de cette discipline, au détriment de ses autres besoins, par exemple une source de neutrons.

Par ailleurs, il est souvent avancé que la France et le Royaume Uni sont les pays européens les plus en retard en Europe, dans le domaine du rayonnement synchrotron. D'où la recommandation de construire simultanément SOLEIL et DIAMOND. Or, "*il est évident que si les deux pays étaient réunis et ne formaient qu'un seul Etat, on ne construirait*

pas les deux synchrotrons ", d'où l'intérêt probable de différencier les deux équipements.

On peut envisager, par exemple, qu'une machine haute énergie spécialisée dans l'étude des structures soit construite à Oxford et une autre de plus basse énergie – environ 1,5 GeV - en France, ce qui ne serait pas forcément un handicap pour notre pays, dans la mesure où il n'est pas acquis que les synchrotrons de haute énergie soient plus prometteurs que les machines de basse énergie.

Il faudrait alors mettre au point un financement croisé afin d'égaliser la charge financière des deux pays. Une part de la contribution française pourrait d'ailleurs correspondre à la mise à disposition du Royaume Uni de l'avant-projet détaillé de SOLEIL, dont le coût de réalisation est estimé à 80 millions de francs.

En tout état de cause, il apparaît incontestable qu'une économie est réalisée quand on construit une nouvelle machine sur un site déjà équipé. A cet égard, la décision de prendre le site du CERN comme base pour des nouveaux équipements a été fructueuse, comme l'a montré, a contrario, l'échec américain pour les machines des hautes énergies, lorsqu'un nouveau site au Texas a été préféré à Chicago où une expérience avait été accumulée dans ce domaine.

Une telle considération plaide sans conteste en faveur du site de Daresbury, au lieu d'Oxford pour DIAMOND et en faveur d'Orsay pour SOLEIL.

Sans doute, la solution double d'une machine anglo-française au Royaume Uni et d'une machine franco-anglaise en France permettrait-elle d'aller plus loin en générant les économies qu'il est indispensable de trouver pour obtenir l'accord du ministre chargé de la recherche.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a remercié MM. POINTU et CHARPAK pour leurs propositions méthodologiques et a confirmé son souci, ainsi que celui de M. CUVILLIEZ, Député, rapporteur, de réaliser une étude objective, la seule possible pour obtenir une crédibilité d'autant plus indispensable que l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques exprime d'une même voix le point de vue des deux chambres du Parlement, sans les possibilités habituelles de rattrapage par le jeu des navettes.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a ensuite fait connaître son accord sur la nécessité de proposer des critères explicites pour le choix des solutions qui pourront être proposées dans le rapport.

Dans cette perspective, le critère du coût ne lui a pas semblé prioritaire, car le cadre actuel du financement des grands équipements ne saurait être considéré comme intangible.

Bien au contraire, il apparaît indispensable d'examiner de nouvelles voies comme la modification de la fiscalité des investissements de recherche ou de celle des fondations vouées à la recherche. Au vrai, il est indispensable d'imaginer des solutions acceptables par tous, en particulier par le ministère de la recherche et par les personnels du LURE.

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, a confirmé son accord avec la méthode ainsi proposée. Si le groupe communiste, auteur de la saisine de l'Office, a voulu réagir à une décision trop rapide, brutale et insuffisamment justifiée, il n'en demeure pas moins nécessaire de préparer le rapport à l'aide de méthodes exhaustives et sur la base d'une analyse scientifique du problème.

En toute hypothèse, la nécessité pour les chercheurs de disposer de ressources plus abondantes en rayonnement synchrotron, en France, en Europe et dans le monde entier, est reconnue par tous. De même, un accord existe sur le fait qu'après la prédominance des sciences de la matière dans les utilisations du rayonnement synchrotron, les besoins des sciences du vivant connaissent une croissance très forte et vont probablement supplanter toutes les autres disciplines en terme de temps de faisceau.

S'agissant de la méthode de travail pour la préparation des recommandations, une fois les critères rappelés, il faudra mettre l'accent sur les conditions des différentes solutions, en recensant leurs atouts et leurs inconvénients respectifs.

Un débat s'est ensuite engagé sur le programme des auditions. Sur la proposition de **M. Georges CHARPAK**, les Rapporteurs ont estimé indispensable de rencontrer rapidement, d'une part le Directeur de la Recherche, M. Vincent COURTILLOT, notamment sur la question de l'inscription d'un plan social en vue de la fermeture du LURE à l'ordre du jour de son prochain conseil d'administration, et, d'autre part, M. SOUKASSIAN, un utilisateur éminent des synchrotrons dont l'opinion sur le LURE mériterait d'être portée à la connaissance du groupe de travail. **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a demandé que soit planifiée une rencontre avec les conseillers régionaux d'Ile de France et avec les élus de l'Essonne, pour recueillir leur point de vue sur les effets structurants d'un équipement comme le LURE et les

raisons pour lesquelles une aide à l'implantation de SOLEIL a été décidée.

La parole a alors été donnée à M. Jochen SCHNEIDER, Directeur du Hasylab de Hambourg, où se trouvent deux types de très grands équipements, le collisionneur HERA pour la physique des particules et l'anneau de stockage DORIS dédié à la production du rayonnement synchrotron depuis 1993.

L'Allemagne, comme l'a exposé **M. Jochen SCHNEIDER, Directeur du Hasylab de Hambourg**, dispose de 5 installations produisant des rayonnements synchrotrons, chacune possédant des caractéristiques et des vocations diversifiées.

A Hambourg, se trouve l'anneau de stockage DORIS de 2^{ème} génération, utilisé avec des positrons d'une énergie de 4,45 GeV, orienté vers la recherche, et spécialisé dans la gamme des rayons X "*durs*". L'anneau de stockage PETRA fait partie du système d'injection d'HERA et actuellement utilisé pour la recherche, la production de rayonnement synchrotron étant accessoire. PETRA est exploité avec des électrons ou des positrons d'une énergie de 12 GeV, ce qui permet à cette installation d'être en pointe pour les X "*très durs*". Les anneaux de stockage sont complétés par un laser à électrons libres, avec un Linac basé sur la technologie supraconductrice et qui est une source très puissante de rayonnement électromagnétique dans l'ultraviolet.

A Berlin, se trouvait jusqu'à la fin de l'année 1999, le synchrotron de 2^{ème} génération BESSY I, d'une énergie de 0,8 GeV, dont le domaine d'application privilégié est la recherche et dont les applications sont celles des rayons X "*mous*". Sur le même site, le synchrotron BESSY II, de 3^{ème} génération, opérationnel depuis la fin de l'année 1999 est spécialisé dans la production de rayons ultraviolets et de rayons X "*mous*". En utilisant des wigglers supraconducteurs, BESSY II produira aussi des rayons X "*durs*".

Karlsruhe est le site sur lequel est construit, à l'initiative de la région, le synchrotron de 3^{ème} génération ANKA, d'une énergie de 2,5 GeV, spécifiquement dédié à l'industrie et orienté vers les applications d'analyse et de microfabrication. Répondant à des demandes de précision de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, et de **M. Jean JERPHAGNON, M. Jochen SCHNEIDER** a indiqué qu'il s'agit d'une machine conventionnelle décidée sans une demande forte de la communauté scientifique et qui a, semble-t-il, quelques difficultés, pour le moment, à impliquer l'industrie allemande.

Les deux autres installations sont à vocation universitaire et se trouvent l'une à Bonn et l'autre à Dortmund. L'installation ELSA située au sein de l'université de Bonn comprend une source continue d'électrons, d'une puissance de 3,5 GeV et un synchrotron d'une puissance de 2,5 GeV. Le synchrotron DELTA de l'université de Dortmund possède, quant à lui, une puissance de 1,3 GeV.

Pour M. Jochen SCHNEIDER, l'accessibilité d'un synchrotron est un paramètre très important pour ses utilisateurs. La situation allemande est satisfaisante à cet égard. Avec une bonne répartition d'équipements de ce type sur tout le territoire, les temps d'accès des utilisateurs sont réduits au minimum. Par ailleurs, la présence de machines au sein des universités, en permettant la formation des étudiants, est le gage de nouvelles avancées dans ce domaine.

C'est pour ces raisons que, selon M. Jochen SCHNEIDER, la France et le Royaume Uni ont l'une comme l'autre besoin d'un synchrotron national supplémentaire.

En toute hypothèse, ce besoin serait identique dans la situation limite évoquée par M. Georges CHARPAK où les deux pays seraient considérés comme ne faisant qu'un dans le domaine de la recherche. Pour autant il ne s'agit pas de construire deux synchrotrons plus ou moins identiques dans les deux pays.

Un tel projet n'aurait pas de sens car chaque synchrotron doit refléter les compétences et les besoins de la communauté scientifique auquel il est destiné. A cet égard, les points forts de la recherche anglaise ne sont pas les mêmes que ceux de la recherche française.

Il n'est pas usurpé de dire que le Royaume Uni possède une compétence très forte dans le domaine de la cristallographie des protéines. Un nouveau synchrotron britannique devra apporter une contribution aux besoins de la biologie structurale. C'est pourquoi, au reste, il serait difficile de vendre l'avant-projet détaillé de SOLEIL au Gouvernement britannique car cette machine n'est pas spécifiée pour la biologie structurale.

A l'inverse, les scientifiques britanniques ne s'attacheront pas à faire avancer la technologie d'un nouveau synchrotron, par exemple en développant un laser à électrons libres, ce qui précisément figure dans le projet SOLEIL. Ce dernier est le fruit d'une communauté scientifique dont les centres d'intérêt sont différents de ceux de la communauté scientifique d'outre-Manche.

En tout état de cause, la France doit veiller à développer ses points forts. Le laser à électrons libres représente, pour M. Jochen SCHNEIDER, l'avenir de la production de rayonnements électromagnétiques à haute brillance. Or la combinaison rare d'une expertise en rayons X et en laser à électrons libres existe en France. Elle doit être non seulement sauvegardée mais cultivée.

M. Jochen SCHNEIDER a alors remarqué que si la France voulait s'équiper, à l'instar de l'Allemagne, de plusieurs synchrotrons répartis sur tout l'hexagone, alors sans doute faudrait-il élaborer une version compacte du projet SOLEIL dont la puissance fait une installation à vocation nationale.

Mais le plus important pour la France est "*de ne pas perdre davantage de temps*".

La genèse du projet SOLEIL a déjà duré trop longtemps. Le développement des technologies des synchrotrons est extrêmement rapide. Il est prouvé que l'on gagne trois ordres de grandeur en brillance tous les dix ans depuis 1970. Chaque nouvelle machine a donc permis de créer des rayons X assortis d'applications nouvelles. L'idée de cohérence des faisceaux ne faisait pas partie du cahier des charges de l'ESRF. Or, grâce aux progrès technologiques enregistrés dans cette installation, il est devenu possible de construire, par contraste de phases, des images de matériaux "*mous*" et non cristallisés. De même, grâce à la robotisation de certains appareillages, les manipulations relatives à la biocristallographie sont presque industrialisées.

La France possède les compétences pour participer au développement des nouveaux outils du rayonnement synchrotron et pour y jouer les premiers rôles. Si d'aventure il était décidé d'aller seulement chercher de nouvelles ressources au Royaume Uni, la France "*perdrait ses compétences*" pour, au final, accéder à une machine optimisée pour la seule discipline de la biocristallographie et non pour servir les nombreuses autres disciplines qui ont besoin d'accéder à des lignes de lumière.

M. Georges CHARPAK s'est alors interrogé sur les changements éventuels qu'il faudrait apporter à SOLEIL, dans l'hypothèse où la France disposerait de 7 lignes de lumière sur DIAMOND. Les besoins de la biologie étant satisfaits, sans doute alors serait-on en droit d'exiger une économie correspondante sur SOLEIL en diminuant sa puissance ou le nombre de ses lignes de lumière.

M. Jochen SCHNEIDER est alors revenu sur l'importance des interactions entre les très grands instruments et le milieu scientifique environnant. Quand un synchrotron est implanté dans une zone géographique riche en laboratoires, les priorités de recherche de ces derniers se modifient fréquemment, l'ensemble des chercheurs qui se trouvent dans l'orbite du très grand équipement pouvant souhaiter l'utiliser.

On peut donc redouter une saturation rapide d'un synchrotron implanté au Royaume Uni, par le double effet de la révélation de nouveaux besoins anglais et d'un changement des priorités de recherche, ce qui pourrait remettre en cause la présence française.

M. Georges CHARPAK ayant remarqué que l'exemple du CERN, qui a attiré à lui tous les physiciens des particules d'Europe voire du monde entier, contredit l'importance du critère de proximité, **M. Jochen SCHNEIDER** a souligné que l'utilisation d'un accélérateur pour la physique des hautes énergies diffère totalement de celle d'un synchrotron. Un équipement tel que le CERN concerne une seule famille de chercheurs scientifiques, parlant la même langue technique et formant un réseau mondial étroitement coordonné.

Au contraire, il existe une grande variété de cultures scientifiques autour d'un synchrotron qui irrigue des disciplines très variées, d'où l'importance de disposer d'un tel équipement dans une zone de recherche en pointe dans toute une série de domaines.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI a alors indiqué que la perspective d'exportation de l'avant-projet détaillé SOLEIL est " *illusoire* ". Ce projet s'appuie en effet sur les points forts de la France dans les technologies des synchrotrons, ce qui ne s'exporte pas.

Par ailleurs, l'industrie pharmaceutique attend d'un synchrotron qu'il lui apporte un service dans le domaine de la brevetabilité des gènes où les techniques de la RMN apparaissent à la fois trop longues à mettre en œuvre et insuffisamment performantes.

En toute hypothèse, la France n'a aucun intérêt à se livrer aux exigences d'une industrie pharmaceutique qui voit dans un synchrotron un outil pour élucider des structures " *à la chaîne* ".

M. Georges CHARPAK a alors estimé que le ministère de la recherche devra dire clairement si la France pourra faire ce qu'elle veut sur les 7 lignes dont elle devrait disposer sur DIAMOND.

A ce stade de la réunion, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a relevé l'importance des remarques de M. Jochen SCHNEIDER, au sujet de la complémentarité nécessaire de deux machines implantées l'une au Royaume Uni et l'autre en France. D'une part, la croissance des besoins de la cristallographie des protéines en rayonnement synchrotron est avérée. D'autre part, il paraît essentiel de développer les techniques de la spectroscopie et la technologie des lasers à électrons libres. Or une machine polyvalente risquerait d'être inadaptée à la poursuite de l'un comme de l'autre de ces deux objectifs. Il apparaît donc prioritaire de définir des caractéristiques d'avenir pour les deux synchrotrons dont la construction pourrait être recommandée simultanément.

M. Georges CHARPAK ayant observé que si la France veut être compétitive dans la génomique, il est nécessaire d'accéder au synchrotron DIAMOND, pour le nombre total prévu de 7 lignes de lumière et que réciproquement, les chercheurs britanniques pourraient se voir réserver une place sur le synchrotron français, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a demandé à M. Jochen SCHNEIDER de bien vouloir préciser, dans un document écrit, ses recommandations quant aux voies d'avenir pour deux nouvelles machines complémentaires.

Afin de commencer à répondre à cette demande, **M. Jochen SCHNEIDER** a alors estimé approprié que l'industrie pharmaceutique française puisse accéder au Royaume Uni à des lignes de lumière spécialisées dans l'étude des protéines. Il a aussi remarqué qu'une installation dédiée à ce type d'études doit faire preuve de fiabilité et être exploitée selon une planification rigoureuse pour satisfaire au mieux les besoins immédiats des industriels. Aucune recherche sur les technologies des synchrotrons ne peut donc y prendre place et une telle machine ne peut en aucun cas intéresser les spécialistes de cette discipline.

La typologie suivante apparaît donc adéquate : d'une part un synchrotron à vocation industrielle au Royaume Uni et d'autre part une machine certes utile pour les applications du rayonnement synchrotron dans différentes disciplines mais se prêtant aussi au développement de nouvelles technologies des rayonnements électromagnétiques. Au vrai, il paraît toutefois difficile pour le moment de porter un diagnostic sur le projet DIAMOND, dont les contours ne sont pas encore connus.

M. Guy OURISSON, Président de l'Académie des Sciences, a alors indiqué que le Wellcome Trust qui devrait être partenaire de DIAMOND est bien une structure indépendante des laboratoires Glaxo Wellcome,

dont on sait par ailleurs qu'ils ont très récemment fusionné avec la firme SmithKline Beecham. Par ailleurs, si la structuration du milieu environnant par un très grand équipement est un phénomène incontestable, il faut aussi remarquer que les biologistes ont intégré dans leurs méthodes de travail la nécessité de se déplacer pour accéder aux grands instruments. C'est notamment le cas de chercheurs fixés à Strasbourg. Certes, si la machine est sur place, l'accès est plus facile mais là n'est pas l'essentiel.

Par ailleurs, M. Guy OURISSON a observé que l'éventualité de prendre une participation dans un synchrotron anglais tout en construisant un synchrotron en France, ne pouvait se faire qu'en diminuant les crédits des laboratoires, y compris ceux qui en servent pas du rayonnement synchrotron. En réalité, *" ce qu'il faut faire, c'est un seul synchrotron et qu'il soit européen "*.

Enfin M. Guy OURISSON a contredit l'opinion exposée au cours d'une audition précédente, selon laquelle la RMN est une méthode trop lente pour la biologie structurale. Au vrai, selon M. OURISSON, cette technique a déjà fait des progrès substantiels et en fera d'autres encore plus importants à l'avenir.

Pour clore l'audition de M. Jochen SCHNEIDER, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, s'est interrogé sur le point de savoir si SOLEIL n'a pas une taille et une complexité trop importantes pour servir au mieux une communauté des scientifiques non spécialistes des synchrotrons.

M. Jochen SCHNEIDER a répondu que deux possibilités existent pour fournir un service apprécié des industriels : d'une part l'automatisation la plus poussée possible qui permet à des expérimentateurs non avertis d'opérer par eux-mêmes et d'autre par l'encadrement très étroit de ceux-ci par des permanents du site. En conséquence, tout est fonction du mode d'exploitation choisi.

La parole a alors été donnée à M. Pierre PAPON, Président de l'Observatoire des Sciences et des Techniques.

*

Pour commencer son propos, **M. Pierre PAPON, Président de l'Observatoire des Sciences et des Techniques**, a rappelé les importants travaux du Comité des grands équipements scientifiques et de la Fondation européenne de la science sur le rayonnement synchrotron.

Quelle est l'utilisation actuelle du synchrotron LURE ? La majorité des utilisations concernent les sciences physiques et chimiques : études de structure des matériaux, études de surface, études de dynamique, en particulier de transitions de phases, optique, absorption des rayons X et spectroscopie IR etc. Par ailleurs, les travaux sur les bio-molécules commencent à prendre de l'importance.

En termes d'équipements lourds ou mi-lourds, la biologie recourt pour le moment aux sources de neutrons, comme celle de l'Institut Laue-Langevin (ILL) de Grenoble, et à la résonance magnétique nucléaire (RMN). Le rayonnement synchrotron devrait toutefois voir ses applications croître rapidement dans le domaine de la biocristallographie, comme on le constate déjà sur de nombreuses machines.

A cet égard, la Fondation européenne de la science, dans son rapport de 1998 sur l'utilisation du rayonnement synchrotron dans les sciences du vivant, confirme cette évolution, à laquelle l'ESRF a beaucoup contribué par l'excellence de ses résultats, et recommande que les synchrotrons existant en Europe ou en projet à la date de l'étude soient équipés en lignes de lumières dédiées à la biologie structurale. Les statistiques dont fait état la Fondation européenne de la science, tant pour l'Europe que pour les Etats-Unis, montrent une croissance des applications du rayonnement synchrotron en biologie et une diminution dans celui de la physique et de la chimie.

Cette croissance des besoins de la biologie est observée à l'ESRF de Grenoble comme à Hambourg (DESY) où se trouvent même des lignes de lumière dédiées financées par l'EMBL. Quant au synchrotron italien ELETTRA en fonctionnement à Trieste, la moitié de sa capacité est affectée à la biologie, avec au surplus, une possibilité réelle d'installer de nouvelles lignes.

Pour autant, il semble difficile de prévoir les besoins à 10 ans. D'autant que la RMN, jusqu'ici limitée à la résolution de structures de masses moléculaires de 20 000 à 30 000 devrait progresser.

Avec de très hauts champs magnétiques permettant l'utilisation de fréquences supérieures à 1 GHz, il sera possible, tout à la fois, de déterminer des structures de masses moléculaires de l'ordre de 100 000 et d'effectuer des études dynamiques.

" La constitution de réseaux d'équipements de RMN à très haut champ est à l'ordre du jour aux Etats-Unis et pourrait également s'appliquer à la France et à l'Europe, avec une bonne couverture du territoire ".

On peut donc estimer qu'à l'avenir, *" il existera des équipements complémentaires, voire partiellement substituables aux synchrotrons "*.

M. Pierre PAPON a alors détaillé la situation de l'Europe, dont les besoins, estime-t-il, justifient davantage l'installation de lignes de lumière dédiées à la biologie structurale que la construction de nouveaux anneaux de stockage au-delà de ceux prévus.

Il existe en effet un parc de 8 synchrotrons opérationnels de performances très différentes et de 4 ou 5 en cours de réalisation ou dont la construction a été décidée, dont SOLEIL-DIAMOND. La Suisse disposera d'une machine comparable à SOLEIL au terme de la construction du SLS, dont la puissance est l'ordre de 2 GeV. L'Allemagne va disposer avec ANKA à Karlsruhe d'une nouvelle source de 2,5 GeV et avec BESSY II à Berlin d'un autre synchrotron de 3^{ème} génération. Il existe donc *" un spectre de machines différentes "* en Europe. Parmi les installations les plus performantes, l'ESRF figure au premier rang, suivi de celles de Daresbury, de Hambourg et de Berlin.

Il paraît difficilement compréhensible qu'aucune information ou coopération européenne n'ait précédé les décisions relatives aux derniers projets de synchrotron. Tant pour ces équipements que pour les réacteurs à neutrons et avec en perspective une source de neutrons à spallation, une stratégie commune, bilatérale ou trilatérale, est indispensable, prévoyant une répartition égale de ces installations entre les parties prenantes. La bonne politique pour la France consiste sans nul doute, pour M. Pierre PAPON, à prendre note des besoins et à élaborer d'un commun accord avec un ou plusieurs partenaires un programme de construction et d'utilisation des divers très grands équipements nécessaires avec une juste répartition géographique de ceux-ci.

La France s'est efforcée quant à elle de rationaliser sa politique en la matière avec le comité des grands équipements scientifiques présidé pendant plusieurs années par M. Pierre AIGRAIN, comité dissout par M. François d'AUBERT.

S'agissant des actions de l'Union européenne dans le domaine des grands équipements, M. Pierre PAPON a souligné l'importance du programme *" Access to Research Infrastructures "*, doté d'un budget de 180 millions d'euros pour la durée du Vème programme cadre et dont il préside cette année le comité des propositions. Ce programme répond bien à son objectif de favoriser la mobilité des chercheurs. Le LURE, par exemple, bénéficie d'un contrat moyennant un quota d'accès de 15 à 20 % d'étrangers. Les chercheurs français bénéficient à leur tour de

ce programme notamment pour se rendre à Trieste sur le site du synchrotron Elettra. Outre l'accès à des ressources expérimentales de pointe, le programme a une autre vertu essentielle, celle de favoriser les échanges entre chercheurs européens.

M. Pierre PAPON a estimé au total que la distance du grand équipement par rapport au laboratoire originel n'est pas une question importante et que "*la délocalisation n'est pas un obstacle à la recherche*", bien au contraire. Les rencontres informelles à l'ESRF ou à l'ILL de Grenoble donnent souvent naissance à des coopérations informelles puis à des projets communs.

Faisant référence à un autre domaine, M. Pierre PAPON a cité l'exemple du premier navire océanographique franco-espagnol d'un coût de 300 millions de francs, dont la construction, décidée à l'initiative de l'Ifremer pour la France, permet à la fois la mise en commun de méthodes scientifiques différentes et la décrispation de relations qui tournent souvent à l'affrontement entre marins pêcheurs des deux pays.

La construction d'un équipement en commun avec d'autres pays peut être ainsi valorisante et permettre d'aboutir à un résultat plus performant. Il a également cité l'exemple de l'Institut Laue-Langevin (ILL) dont les premiers utilisateurs dans le domaine de la biologie furent anglais, suivis ensuite par les chercheurs français stimulés sans doute par leurs collègues britanniques.

Pour ce qui est des effets d'entraînement des grands équipements, M. Pierre PAPON a remarqué que selon lui, "*il n'existe aucune étude économique qui montre que les très grands équipements aient un impact économique direct sur l'économie régionale*". Bien évidemment, un équipement comme DIAMOND ou SOLEIL aurait un intérêt direct pour l'industrie pharmaceutique. Par ailleurs, le versement de rémunérations aux salariés permanents de l'installation et les contrats de sous-traitance sont évidemment bénéfiques à l'activité locale.

Mais les études sur la recherche et l'innovation, et sur la recherche dans les régions que la Commission européenne a diligentées, n'ont pas mis en évidence une quelconque corrélation entre la présence d'un très grand équipement et un dynamisme économique local fondé sur des transferts de technologie. De même les indicateurs sur la science et la technologie produits par l'OST ne permettent pas de tirer de conclusions sur ce point.

S'exprimant sur plusieurs thèmes évoqués par l'orateur, **M. Gilles COHEN-TANNOUJ** a fait valoir d'une part qu'il est de la

responsabilité du Gouvernement de préserver la diversité scientifique du pays, d'autre part que le comité des grands équipements scientifiques a été supprimé le 2 novembre 1999 par le présent gouvernement au motif, rapporté par la presse, qu'il s'agissait d'un lobby d'une efficacité redoutable et enfin que, dans le cadre de la construction du futur LHC (Large Hadron Collider), les pays hôtes ont été "taxés" précisément parce qu'ils bénéficieront de retombées économiques.

M. Georges CHARPAK a remarqué qu'incontestablement, SOLEIL et DIAMOND présentent des différences sensibles parce qu'ils doivent répondre à des besoins locaux différents. Par ailleurs, il a estimé important de noter que le ministère s'efforce de faire entendre que la part française dans DIAMOND représenterait à peu près la moitié des ressources offertes par SOLEIL, sans qu'il soit fait allusion à une "*perte de liberté*" sur le type de sciences que les chercheurs français pourraient pratiquer sur les lignes de lumière dévolues à la France. Il est donc capital de tirer au clair ce qu'est véritablement le Wellcome Trust, à propos duquel les opinions divergent du tout au tout.

M. Pierre PAPON a jugé important de vérifier l'assertion selon laquelle les synchrotrons sont nécessairement spécialisés, l'important selon lui étant que les lignes de lumière le soient. Il a également confirmé que le Wellcome Trust, s'il a bien un capital "*hérité*" de la firme pharmaceutique Glaxo Wellcome, jouit néanmoins d'une large autonomie, et préfère implanter DIAMOND à Oxford ou Cambridge, plutôt que dans le "*relatif vide scientifique*" de Daresbury.

Dans la discussion qui a suivie, différents thèmes ont été abordés.

Le caractère irremplaçable du rayonnement synchrotron pour la biologie structurale a été encore une fois souligné par **M. Jochen SCHNEIDER**. Selon ses informations, aucun spécialiste des protéines n'est désireux de remplacer le rayonnement synchrotron par la RMN. Ainsi qu'il l'a exprimé avec force, "*les biologistes veulent comprendre le fonctionnement des machines moléculaires et pour cela il faut le rayonnement synchrotron*", même si les statistiques du nombre d'utilisateurs par discipline sont à prendre avec précaution dans la mesure où un chercheur résolvant une structure moléculaire en un jour, grâce à des procédures presque standardisées, compte autant qu'un utilisateur restant quinze jours sur le site pour mettre au point une manipulation sophistiquée.

S'agissant du manque de concertation en Europe pour arrêter les projets de synchrotrons dans les années récentes, **M. Jochen**

SCHNEIDER a pointé la grande différence qui existe entre les vitesses de développement des sources de neutrons pour lesquelles une concertation a, en effet, pu être mise en place, et celle des synchrotrons.

La technologie des sources de neutrons est stable depuis 20 ans et à cet égard, aucune installation plus performante que la source de l'ILL n'a pu être mise au point. La situation est entièrement différente pour les synchrotrons, où les progrès continuent d'être rapides. On l'a vu, à propos de la cohérence. D'autres exemples peuvent être cités, comme celui des mini-ondulateurs, mis au point il y a trois ans à Brookhaven et repris depuis dans de nombreuses installations. Dès lors, selon M. SCHNEIDER, toute planification pour des machines multinationale de 3^{ème} génération court le danger d'être trop lente.

Mais ce qui apparaît capital à M. Jochen SCHNEIDER, c'est que dans le concert mondial des synchrotrons, la France continue d'attirer à elle les utilisateurs de ce type de rayonnement par sa "*composante créative*" qui permet actuellement d'y disposer de ressources introuvables ailleurs.

Si le projet SOLEIL était abandonné, la France serait rapidement réduite au rang d'un pays comme le Portugal qui n'a pas de maîtrise des technologies des synchrotrons. A cet égard, **M. Pierre PAPON** a, lui aussi, jugé important que la France garde ses compétences dans ces domaines.

Quant à l'impact économique d'un très grand équipement, **M. Jochen SCHNEIDER** a fait mention d'une étude réalisée à Hambourg préalablement à la décision d'y construire le collisionneur HERA pour un montant de 1,3 milliard de DM valeur 1990 et qui démontre sans conteste l'impact économique général d'un tel investissement de recherche.

Complétant son propos initial, **M. Pierre PAPON** a alors exposé les résultats d'une enquête tirée du rapport 1999 de l'Observatoire des Sciences et des Techniques et portant sur les performances scientifiques des principales villes européennes mesurées par le nombre de publications scientifiques et de brevets de leurs laboratoires de recherche publics et privés. Selon cette enquête, la première place pour les dépôts de brevets européens en 1997 est occupée par Munich et la seconde par Paris et sa petite couronne, deux villes dans lesquelles on ne trouve pas de grand équipement, alors qu'Hambourg avec les installations HERA et DORIS ne décroche que la 31^{ème} place.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a toutefois souligné que les collectivités locales sont prêtes à suivre les efforts de l'Etat en faveur d'un nouveau synchrotron, une volonté qui repose sans nul doute sur des raisons valables.

Reprenant plusieurs des questions abordées au cours de la matinée, **M. Jean GALLOT** a fait alors remarquer que "*l'on ne peut gommer l'histoire*" à aucun des niveaux de l'analyse.

Un synchrotron est certes un équipement mais c'est aussi un ensemble des ressources humaines, celles des équipes de chercheurs dont les compétences irriguent un espace économique et les pôles d'enseignement voisins. On ne saurait à cet égard minimiser l'impact d'un grand équipement comme un synchrotron sur le niveau des étudiants des structures universitaires voisines.

Au reste, la création d'un centre de compétences change toujours la donne, qu'il s'agisse de laboratoires ou d'une université, comme on l'a constaté par exemple avec la création de l'université de Rouen. Certes, l'impact est progressif mais les exemples historiques abondent qui démontrent le rôle structurant sur une région d'équipements scientifiques de haut niveau.

Par ailleurs, même s'il est regrettable qu'une concertation européenne n'ait pas eu lieu par exemple à l'occasion de la construction de nouvelles machines en Europe comme ANKA, la priorité doit désormais être donnée au maintien et au développement des spécialités françaises de niveau mondial que sont la spectroscopie rayons X et les technologies des synchrotrons.

En toute hypothèse, la coopération européenne n'exclut pas la réalisation de projets nationaux, bien au contraire puisque, pour être invité à coopérer, il faut faire la preuve d'une qualité scientifique suffisante.

Il reste que la conduite simultanée des indispensables projets nationaux et des coopérations européennes souhaitables serait plus aisée avec un budget en augmentation significative, une augmentation dont le budget de la recherche ne bénéficie malheureusement pas depuis quelques années et en particulier pour l'année 2000.

Après cette dernière intervention, M. René PELLAT, Haut Commissaire à l'énergie atomique a été invité à s'exprimer en tant que responsable auprès du ministre de la recherche du dossier de l'accroissement des ressources françaises en rayonnement synchrotron.

*

M. René PELLAT, Haut Commissaire à l'énergie atomique, a alors précisé qu'il est effectivement chargé par le ministre chargé de la recherche de piloter deux groupes de travail sur le dossier synchrotron.

Le premier groupe est chargé des dossiers SOLEIL et DIAMOND, et en particulier des négociations avec le Royaume Uni.

Le deuxième groupe a la charge de gérer la période transitoire en prenant des contacts avec les centres de rayonnements synchrotron européens comme SLS en Suisse ou Elettra en Italie. Il s'agit de coordonner les approches du CNRS et du CEA dans la perspective de la location ou de l'achat de lignes de lumière garantissant l'accès des chercheurs français à des machines en fonctionnement.

Un troisième groupe, organisé par le ministère, a la charge de réunir des compétences européennes et de faire émerger une concertation entre les pays correspondants.

Ces groupes devront conclure leurs travaux à l'horizon d'un an.

M. René PELLAT s'est félicité de l'accord de tous les organismes concernés pour la constitution des groupes de travail, qui témoigne d'un "*bon esprit*".

Il a ajouté qu'intellectuellement "*on va vers des machines spécialisées*".

La marche vers les hautes énergies correspondant aux rayons X exigés par la biologie structurale n'affranchit pas en effet de la nécessité de satisfaire les autres besoins qui, eux, correspondent aux basses énergies. Certes, il est possible de dégrader les rayonnements haute énergie en rayonnements basse énergie. Mais une machine haute énergie, aux caractéristiques "*très pointues*" coûte 3 à 4 fois plus cher qu'une machine spécialisée dans l'UV. La taille d'un synchrotron et son coût sont en effet fonction de l'énergie du rayonnement à produire. On peut estimer à cet égard que le remplaçant du LURE pourrait coûter trois à quatre fois moins cher que DIAMOND.

D'autres caractéristiques de fonctionnement différencient une machine de basse énergie d'une machine haute énergie : les biologistes font des "*photos*" et n'immobilisent pas longtemps une ligne de lumière alors qu'en mécanique, en chimie ou en physique, deux mois peuvent être nécessaires pour la mise au point d'une manipulation.

M. René PELLAT a également indiqué qu'une machine ne peut être séparée du développement scientifique et humain, tant les compétences sont fondamentales.

En tout état de cause, *" si le choix est fait de machines dédiées, alors il faudra une machine moderne en UV "*. De surcroît, si l'Union européenne se rassemble, il faudra une machine en dehors de SOLEIL et de DIAMOND.

Concernant ce dernier projet, comme les chercheurs anglais ont un niveau très élevé en biologie, il serait avantageux de mettre en place des laboratoires communs permettant de bénéficier d'un savoir plus avancé, d'où des profits indirects tirés de la participation au projet DIAMOND. L'implantation éventuelle de cet équipement à Daresbury poserait un problème supplémentaire, puisque les compétences sont à Oxford et à Cambridge, encore que pour une machine spécialisée dans les applications de la biologie structurale, l'environnement local compte moins que pour la physique.

M. René PELLAT a noté qu'au démarrage de sa mission, le climat était mauvais, sans doute en raison d'une traduction maladroite de l'argumentation des tutelles. L'idée selon laquelle *" tout nouveau très grand équipement sera européen "* semble toutefois mieux comprise aujourd'hui. Avec le recul et davantage d'explications, le CNRS et le CEA sont désormais d'accord pour constituer les groupes de travail et y détacher les spécialistes indispensables à l'instruction des dossiers. Une fois celle-ci terminée, *" on verra quelle est l'évolution du Wellcome Trust et s'il y a des idées nouvelles "*.

M. Georges CHARPAK a estimé intéressante l'idée de machines dédiées. Ainsi, sur un synchrotron anglais DIAMOND orienté vers la satisfaction des besoins de la biologie et de l'industrie pharmaceutique, la France pourrait disposer de lignes de lumière au demeurant inadéquates pour la physique. Avec une autre machine dédiée, moins coûteuse que DIAMOND, et accessible par réciprocité aux chercheurs du Royaume Uni, l'ensemble ferait *" quelque chose de raisonnable "*.

M. René PELLAT a confirmé que les chercheurs anglais attendent, de fait, autre chose que DIAMOND pour les faibles énergies. Au reste, cette solution serait à l'avantage de la France puisque la machine spécialisée dans les expériences de physique pour lesquelles la proximité des laboratoires est avantageuse, serait sur son sol. Au surplus, des possibilités d'accès à des machines européennes existent, comme à Trieste où le synchrotron ELETTRA est sous-utilisé actuellement par manque de potentiel scientifique et industriel local.

M. Jean JERPHAGNON s'est interrogé sur la possibilité effective de réaliser un ensemble diversifié d'expérimentations sur un synchrotron dédié et ceci grâce à l'adaptation des lignes de lumière.

M. René PELLAT a confirmé que le fonctionnement d'une machine produisant des faisceaux de forte brillance et de haute énergie peut être "dégradé" volontairement de façon à répondre aux besoins en rayonnements de plus faible longueur d'onde. Toutefois, une machine de type SOLEIL ou DIAMOND tournée vers la biologie, qui nécessite un anneau plus grand, coûte 4 fois plus cher (1,6 milliard de francs) qu'une machine de basse énergie. Or si les sources de neutrons connaissent une stagnation de leurs technologies, les progrès faits sur les onduleurs et les dispositifs de contrôle des synchrotrons ont été importants au cours des années 1990, de sorte qu'il est possible de les utiliser à bon escient pour construire des machines de basse énergie peu coûteuses. Ainsi, pour M. René PELLAT, "*la philosophie globale, c'est cela. Le groupe européen conclura cela*".

Tout en ne négligeant pas les aspects locaux, il faut s'entendre sur la répartition des synchrotrons et des très grands équipements en Europe et être intransigeants dans les négociations sur la qualité et les compétences.

M. Jochen SCHNEIDER a alors donné son point de vue sur les coûts respectifs des différents types de synchrotrons. Certes un synchrotron spécialisé dans la production de rayonnements UV est moins coûteux qu'un synchrotron dédié aux rayons X. Mais ceci est vrai au niveau de l'accélérateur et des anneaux de stockage et ne l'est pas pour les lignes de lumière. Les lignes de lumière correspondant aux rayons X sont moins coûteuses que celles mises en œuvre pour l'utilisation de rayonnements UV.

En conséquence, c'est l'ensemble constitué de la machine proprement dite et des lignes de lumière qu'il faut comparer. Si l'on veut bien faire le total équipements de base et lignes de lumière, alors l'investissement total "*machines + lignes de lumière*" d'un synchrotron basse énergie s'approche de celui d'un synchrotron à rayons X.

A ce stade de l'intervention de M. Jochen SCHNEIDER, **M. René PELLAT** a fait remarquer que l'on dispose des lignes de lumière du LURE, qui pourraient être réemployées sur une autre installation. **M. Jochen SCHNEIDER** a ultérieurement jugé que la greffe d'équipements anciens sur une machine de nouvelle génération est une opération rarement vue dans l'histoire des techniques.

M. Jochen SCHNEIDER est ensuite revenu sur la nécessaire proximité du synchrotron par rapport à ses utilisateurs, une question qu'il juge essentielle. Il a noté que les biologistes allemands expriment désormais le besoin d'accéder à un synchrotron en remplacement de leurs équipements rayons X de laboratoire. En effet, la cristallisation de protéines est un phénomène lent, prenant de 3 à 4 semaines, de sorte qu'il leur paraît préférable de faire rapidement un cliché sur un microcristal, comme le rayonnement synchrotron le permet, plutôt que d'attendre plus longtemps pour contrôler le processus de cristallisation avec leur équipement de laboratoire, au risque de perdre un mois si ce processus n'a pas débouché. En tout état de cause, M. Jochen SCHNEIDER estime fondée cette aspiration des biologistes, tout en estimant qu'il leur appartient de réunir les financements nécessaires. Au reste, il a aussi remarqué que les groupes travaillant sur le ribosome à Hambourg, réalisent des expériences de contrôle dites de "*screening*" sur le synchrotron local DORIS III, puis, assurés de la qualité de leurs échantillons, vont faire des clichés de haute qualité à l'ESRF de Grenoble.

D'où l'utilité de moyens locaux, c'est-à-dire de "*synchrotrons de proximité*" pour la biologie structurale.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a alors établi une synthèse sur la définition technique des synchrotrons.

Grâce aux progrès effectués sur la technologie des synchrotrons, en particulier à l'ESRF, il est aujourd'hui possible de réaliser des synchrotrons "*ayant des performances excellentes tout en restant modestes en énergie*". Avec des niveaux d'énergie de 2 à 3 GeV, il est possible de faire des synchrotrons de 3^{ème} génération apportant des gains remarquables en brillance. D'où l'idée de descendre encore dans les niveaux d'énergie et d'aller vers des machines dédiées.

Cette orientation doit toutefois être examinée avec prudence, en gardant présent à l'esprit le souci de la diversité. A trop spécialiser une machine, on réduirait en effet la "*diversité*" de ses applications et l'on perdrait le bénéfice de "*l'imprévisibilité*" des améliorations obtenues grâce au progrès des technologies des synchrotrons ainsi que la capacité d'imaginer des applications nouvelles.

Au demeurant, il est indispensable de conserver en France un potentiel de compétences de niveau mondial dans la technologie des synchrotrons.

Quant à une éventuelle complémentarité entre une machine française et une machine anglaise, elle ne devrait pas être "*dichotomique*", car les recouvrements entre équipements sont toujours profitables, en ce qu'ils permettent des inter comparaisons et favorisent l'émulation entre les équipes.

De surcroît, il est indispensable de ne pas construire à l'économie le nouveau synchrotron. Ainsi, au début des années 1970, l'accélérateur de nouvelle génération construit au CERN l'a été avec une qualité supérieure à ce qui était strictement nécessaire à l'époque. Cette qualité dans les équipements a permis d'acquérir une avance de 10 ans sur les Etats-Unis que ceux-ci n'ont pas rattrapée depuis.

Dans le cas de SOLEIL, l'avant-projet détaillé définit une machine d'avant garde, capable de servir à la biologie structurale mais aussi à quantité d'autres disciplines, couvrant le spectre des UV jusqu'aux X "*durs*", en passant par les X "*mous*" et prévoyant également un laser à électrons libres. Au total, "*le potentiel de découvertes assuré par cette machine est considérable*".

Enfin, s'agissant de l'éventualité d'un retard de la biologie structurale française par rapport au Royaume Uni, M. Gilles COHEN-TANNOUDI a rappelé que ce n'est pas l'opinion de M. Yves PETROFF, qui constate à l'ESRF un coefficient de retour scientifique et économique pour la France supérieur à 1.

Au reste, "*les besoins de la communauté scientifique française en rayonnement synchrotron ne seraient pas satisfaits avec une machine dédiée de 1,5 GeV et quelques lignes de lumière achetées ou louées ici ou là*".

En tout état de cause, même si les lignes allouées à la France sur DIAMOND devaient être au nombre de 7, il est exclu de les mettre toutes au service de la seule biologie structurale.

M. Georges CHARPAK a alors remarqué qu'effectivement les 7 lignes de DIAMOND pourraient satisfaire les besoins de la biologie structurale mais que la France aurait un handicap si elle ne disposait pas d'une machine dédiée sur son sol. Mais dans cette hypothèse, complétée par un synchrotron spécialisé au Royaume Uni, il y aurait un équilibre. "*Le programme Pellat tient compte des besoins et optimise les coûts*".

M. René PELLAT a repris la parole pour compléter ses propos liminaires. "*J'ai décidé une approche. Toutefois, de combien de lignes disposerons-nous ? 5,6 ou 7 ? Je n'en sais rien*". Il a noté également

que le CEA veut bénéficier d'une ligne chaude. En tout état de cause, on peut se rapprocher des énergies faibles avec une machine haute énergie. Tant DIAMOND que SOLEIL peuvent remplacer le LURE.

Pour l'heure, l'atmosphère générale est bonne, le CNRS ayant récemment donné son accord pour une concertation européenne élargie. En tout état de cause, au bout d'un certain temps, il faudra investir beaucoup au LURE pour le maintenir en activité. A cette date, il est vraisemblable que le "*panel européen*" aura abouti à des conclusions. Pour protéger la période intermédiaire, c'est-à-dire "*avant la fermeture du LURE et avant l'entrée en service d'une nouvelle machine*", une négociation va être conduite en rassemblant les besoins de tous les utilisateurs. Il s'agit de déterminer quels types et quels nombres de lignes louer en Suisse, en Allemagne et en Italie, que ce soit pour une période de "*deux fois trois ans ou deux fois quatre ans*".

M. Jochen SCHNEIDER a conseillé d'accorder une grande attention au chiffrage du coût des lignes de lumière se trouvant sur une machine située à l'étranger. L'Allemagne en a fait l'expérience à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble, où les frais de détachement et de séjour des techniciens et scientifiques allemands qui y résident se sont très élevés.

Au final, "*à long terme, c'est le pays où se trouve la machine qui en profite le plus*". Il peut même arriver que le pays d'accueil puisse récupérer les infrastructures payées par le partenaire étranger, quand celui-ci ne peut suivre le rythme des dépenses de modernisation indispensables. Quant au nombre de 7 lignes de lumière sur DIAMOND pour la biologie, il paraît surévalué, un nombre de 3 semblant plus proche de la réalité, sous réserve d'une analyse précise.

La spécialisation des grands instruments est, selon **M. Pierre POINTU**, un mouvement général dans le domaine de l'instrumentation. "*Pour améliorer l'efficacité globale, on dédie et on multiplie*". Toutefois, la nature même de la recherche exige qu'un parc de machines spécialisées soit complété par un équipement à vocation plus générale, seul adapté à des études exploratoires ou hors normes. Et s'il est un endroit où existe l'environnement scientifique indispensable à une telle machine généraliste, c'est au LURE, où toutes les disciplines sont présentes.

M. René PELLAT a insisté sur le fait que, même si une machine haute énergie peut fournir, par un processus de dégradation adéquat, des rayonnements basse énergie, il existe des tendances lourdes différenciant les types d'utilisation par les diverses sciences.

La biologie, qui se développe à une vitesse très rapide et conteste la place de la physique, a certes une expérience moins grande des grands équipements scientifiques que cette dernière. Toutefois, les finalités sont clairement différentes, même si les contraintes relatives à la préparation des échantillons devront être vérifiées. Bien entendu, la coopération européenne aurait dû se faire il y a dix ans. Mais, selon M. René PELLAT, le travail qu'il a entamé se fait sur d'une manière " *dépassionnée* ". Et il a ajouté que " *s'il y a des décisions stupides sur le plan scientifique, on le dira* ".

M. Guy OURISSON, Président de l'Académie des Sciences, a noté qu'effectivement les processus expérimentaux varient selon les disciplines. La cristallisation des protéines est difficile et se fait en laboratoire. La résonance magnétique nucléaire évite cette étape, puisque les analyses peuvent se faire avec des échantillons en solution. Ceci est une des raisons pour lesquelles le Japon nourrit le projet d'utiliser la RMN en série pour la biologie structurale des protéines, avec un réseau frontal de spectromètres RMN à 600 MHz dans les laboratoires pour débroussailler les problèmes, avant l'accès à des spectromètres partagés à haut champ de 1 GHz. Ce projet en est à ses prémises, dans la mesure où la RMN à 1 GHz est pour le moment hors d'atteinte, contrairement à celle à 600 MHz.

A la question de **M. Guy OURISSON** sur l'éventualité de voir avec les synchrotrons un schéma analogue de frontaux et de machines de pointe, **M. René PELLAT** a répondu par la négative. La préparation des échantillons par cristallisation se fait dans les laboratoires et la résolution des structures sur les lignes de lumière.

S'agissant de la RMN, **M. Jochen SCHNEIDER** a mentionné les résultats d'une étude de la Fondation européenne pour la science sur les avantages respectifs de la RMN et du rayonnement synchrotron dans la gamme des rayons X.

Pour la majorité des spécialistes consultés, il est inconcevable que la RMN puisse résoudre les structures des " *machines moléculaires* ". De même, la RMN a certes la capacité de permettre de reconstituer des phénomènes dynamiques, mais ceci reste difficile et ne peut intervenir pour les grosses molécules.

En toute hypothèse, M. Jochen SCHNEIDER a appelé de ses vœux le développement de la RMN, notamment pour débroussailler les problèmes avant le passage en synchrotron. Les études préalables seront à l'évidence plus fructueuses avec des spectromètres RMN à 600 MHz.

M. Jean GALLOT a enfin souligné la situation d'urgence dans laquelle la France se trouve. Avec le retard et les tensions accumulées, il faut certes trouver des solutions transitoires. Mais compte tenu de la qualité à la fois des équipes du LURE et du projet SOLEIL, l'urgent est de remotiver des équipes qui, sinon, pourraient se défaire, ce qui représenterait une perte scientifique irréparable.

A cet égard, **M. René PELLAT** a confirmé que la question de la location ou de l'achat de lignes une fois réglée, il y aurait quelques mois pour réagir, l'horizon d'une année devant permettre de traiter le problème d'ensemble.

M. Jochen SCHNEIDER a insisté en l'occurrence sur la nécessité absolue de tracer le plus vite possible des perspectives d'avenir pour les jeunes chercheurs du secteur du rayonnement synchrotron.

Pour clore la réunion, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a fait connaître que le rapport de l'Office sera publié rapidement, afin de rassurer la communauté scientifique et le monde politique, par des recommandations constructives et positives pour la recherche française.

V - Auditions de M. Jean-Pierre CHANGEUX, de M. Yves FARGE et de M. Claude COHEN-TANNOUJDI - mercredi 26 janvier 2000

La réunion a débuté par un exposé de **M. Jean-Pierre CHANGEUX**, Professeur au Collège de France, sur le rayonnement synchrotron et les très grands équipements en tant qu'enjeu scientifique important et sur un autre sujet essentiel de la politique de la recherche, à savoir l'amélioration des interfaces de la biologie avec les autres disciplines scientifiques.

La neurobiologie moléculaire, la spécialité du Professeur CHANGEUX, en ayant comme objectif l'analyse des processus du cerveau et bientôt des états de conscience, attache une importance croissante aux structures moléculaires pour l'étude des fonctions intégrées, d'où l'importance des très grands équipements, et en particulier des synchrotrons.

En substance, M. Jean-Pierre CHANGEUX a observé que, face à l'institutionnalisation obsolète de clivages interdisciplinaires et au pouvoir institutionnel de la physique, il est urgent et indispensable de renforcer les contacts et les échanges interdisciplinaires.

Des clivages disciplinaires obsolètes existent dans nombre de nos institutions scientifiques. Une hiérarchie implicite des disciplines, au profit des mathématiques et de la physique et au détriment de la biologie, est portée par nos écoles les plus prestigieuses comme l'Ecole normale supérieure, ainsi que par nos académies scientifiques. Parmi les grands organismes de recherche, seuls le CNRS et le CEA ont mis en œuvre des interfaces institutionnelles entre les sciences physiques et la biologie, avec toutefois des clivages budgétaires et des évolutions moins favorables à la biologie en termes de crédits. Au demeurant, la médecine et la biologie sont isolées dans des organismes spécialisés, comme l'INSERM et l'INRA ou l'Institut Pasteur, au sein desquels les interfaces avec d'autres disciplines sont complexes à mettre en œuvre.

De même, les très grands équipements scientifiques ressortissent classiquement de la physique même s'ils ont aussi des applications fondamentales dans d'autres disciplines. Au plan institutionnel, on peut dire qu'il n'y a " aucune prise en compte des immenses progrès de la biologie ". Au plan intellectuel, on peut aussi constater qu'une hiérarchie indue se perpétue, puisque aussi bien, comme l'a dit René Thom, " il n'existe pas de théorème en biologie ".

Ces réalités font obstacle à la nécessaire reformulation des relations entre la biologie et la physique qui devrait faire suite à un réexamen systématique de l'importance des différentes disciplines scientifiques dans notre pays et se traduire par une réévaluation de la place de la biologie en raison de ses progrès conceptuels et de l'importance croissante de ses applications industrielles.

Au demeurant, en droite ligne des clivages disciplinaires obsolètes, il existe dans notre pays une primauté de la physique dommageable aux autres sciences.

En premier lieu, la physique tient sa place de ses liens avec les industries de l'armement qui tirent parti, directement ou indirectement, des résultats de ses recherches et lui apportent des contributions budgétaires significatives, sans pour autant qu'une évaluation scientifique adéquate, c'est-à-dire internationale, examine la rentabilité des sommes investies.

En second lieu, la physique bénéficie aussi de ses applications nombreuses et multiformes dans les industries des matériaux, de l'électronique, de l'atome et de l'espace, en particulier.

A cet égard, la politique des très grands équipements ne peut être séparée de la politique de la défense, de l'énergie et de la politique

industrielle. Dans certains cas, comme celui du CERN, le recensement des crédits alloués aux très grands équipements doit même aller jusqu'au budget du ministère des affaires étrangères. En tout état de cause, le calcul devrait être fait de l'efficacité d'une telle utilisation de "*l'argent des citoyens*".

Au vrai, l'allocation de ressources budgétaires considérables à la physique et à ses applications sans contrôle de leur efficacité budgétaire, est pérennisée par le rôle éminent des physiciens dans les instances de direction de la recherche française.

Alors que les Etats-Unis ont fait leur révolution culturelle en donnant une priorité à la recherche en biologie, cette question devrait être débattue publiquement en France. En particulier, il n'est pas acceptable pour les chercheurs du CNRS en sciences de la vie de disposer de deux fois moins de crédits que leurs homologues de l'INSERM et de quatre fois moins de crédits qu'au CEA. Or, l'une des raisons invoquées par la direction du CNRS pour justifier cet écart est précisément la nécessité pour ses laboratoires de biologie de contribuer au financement des très grands équipements dont ils sont supposés se servir.

Si la domination de la physique doit être corrigée, cela signifie surtout que ses interactions avec les autres disciplines, et en premier lieu avec la biologie, doivent être multipliées.

Alors que l'achèvement du décryptage du génome est en vue, la France doit occuper une place en pointe dans le "*post génome*". L'identification des séquences géniques a pour principal but la découverte du codage des protéines, dont le rôle dans les organismes vivants est fondamental. Un autre objectif est la compréhension de l'organisation du génome et de ses interactions avec les protéines.

A tous les stades de la recherche post génomique, la cristallographie des protéines joue un "*rôle décisif*". Le rayonnement synchrotron est l'un des outils fondamentaux de la biologie à cet égard. Or dans notre pays, "*la cristallographie des protéines est une discipline sinistrée*" à cause de l'impérialisme de la chimie traditionnelle. D'ailleurs les travaux de Max PERUTZ, Prix Nobel ne sont pas reconnus en France comme appartenant à la chimie.

Face à ces enjeux fondamentaux, il convient de ne pas diviser la science en disciplines étanches et au contraire d'approfondir la collaboration entre la biologie, la chimie et la physique, en particulier autour des très grands équipements. "*Créer des interfaces entre les disciplines de façon plus constructive*" est un impératif pour l'avenir.

Il reste que, même si la question des très grands équipements ne se résume pas aux seuls synchrotrons, l'imagerie tient d'ores et déjà une place fondamentale et que, selon toute probabilité, les très grands équipements actuels ou futurs joueront un rôle critique dans l'étude de l'activité cérébrale accompagnant les fonctions cognitives et mentales. Des aménagements budgétaires seront donc nécessaires.

Pour lutter contre la myopie des scientifiques qui défendent leur discipline quelquefois sans discernement, il paraît essentiel d'avoir une conception plus large de la recherche, en premier lieu en multipliant les coopérations européennes et mondiales, et, en second lieu, en mettant au premier rang des priorités de la recherche la création d'interfaces entre les disciplines, deux démarches à placer, en tout état de cause, sous l'examen d'une évaluation scientifique rigoureuse.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a alors demandé à M. Jean-Pierre CHANGEUX de préciser si, dans sa vision du développement de la biologie, la localisation en France ou ailleurs de nouvelles ressources en rayonnement synchrotron est un paramètre important.

M. Jean-Pierre CHANGEUX a estimé que la cristallographie est une discipline sinistrée en France, non pas en ce qui concerne le niveau des équipes françaises, qui est excellent, mais pour le nombre d'équipes, inférieur à ce que l'on observe au Royaume Uni.

Or la relation structure-fonction est une question essentielle en biologie. En neurobiologie, les chercheurs de l'Institut Pasteur et du LURE ont ainsi pu mettre en évidence des phénomènes importants comme les changements conformationnels des récepteurs de neuromédiateurs, grâce à un accès aux installations du LURE. Les recherches se poursuivent sur ce thème avec les deux lignes de biologie structurale de l'ESRF à Grenoble. L'intérêt de l'ESRF est de pouvoir analyser des cristaux de très petites dimensions, un avantage essentiel, tant les processus de cristallisation de protéines membranaires sont empiriques et difficiles à maîtriser.

En toute hypothèse, il n'y a pas plus de difficultés à se rendre à Londres qu'à Grenoble, l'important étant la possibilité d'un accès effectif aux faisceaux les plus performants. Par ailleurs, la sélection des projets d'utilisation du rayonnement synchrotron doit être faite équitablement, comme à Grenoble, par un jury international. Si ces conditions sont réunies, la délocalisation de l'équipement ne présente pas d'inconvénient majeur, la question critique étant celle de la saturation éventuelle des grands équipements.

M. Georges CHARPAK a ensuite demandé à M. Jean-Pierre CHANGEUX de faire le bilan de la politique de soutien préférentiel à la biologie conduite par le ministre de la recherche, M. Claude ALLEGRE, afin de rééquilibrer sa place par rapport à celle de la physique.

M. Jean-Pierre CHANGEUX a confirmé qu'il y a un an, le ministre a annoncé publiquement que les crédits des sciences de la vie au CNRS devaient être multipliés par deux en trois ans. C'est en réalité la première fois en France que la biologie bénéficie d'une priorité. Il reste toutefois de nombreux blocages au sein des principales institutions de la recherche française, en particulier au CNRS. Cette augmentation n'a pas eu l'ampleur attendue. En l'espèce, si des décalages existent entre le CNRS et l'INSERM en termes de crédits par chercheur, ce n'est pas le budget de l'INSERM qui doit être diminué mais celui du CNRS qui doit être augmenté, l'objectif n'étant pas une modification des crédits entre les différents organismes mais une augmentation de sommes consacrées aux sciences de la vie.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, ayant noté que les crédits du Fonds pour la Recherche et la Technologie (FRT) permettent en 2000 d'augmenter les crédits de la biologie, M. Jean-Pierre CHANGEUX a estimé qu'au contraire de ces crédits dont la stabilité est sujette à caution, ce sont les crédits institutionnels qui sont les plus importants par leur régularité. Au reste, le doublement des crédits des sciences de la vie, une mesure qui serait spectaculaire, ne constituerait pas une charge impossible pour le CNRS, tant leur montant est peu élevé. En tout état de cause, la contrepartie d'un développement des très grands équipements devrait être l'augmentation des moyens donnés à la biologie pour se développer.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a alors remarqué que si l'on trouve sinistrée une discipline comme la cristallographie des protéines, il est logique alors de lui allouer davantage de moyens, en particulier dans le domaine du rayonnement synchrotron. Or le LURE étant arrivé en fin de course et la limite maximale de temps de faisceau pour la France, fixée par sa part dans le financement total, étant atteinte dans l'ESRF, on arrive donc à une butée que l'abandon de SOLEIL n'effacera pas, bien au contraire.

Pour **M. Georges CHARPAK**, l'important est de donner des moyens supplémentaires, qu'ils se trouvent à Grenoble ou au Royaume Uni.

M. Jean-Pierre CHANGEUX a remarqué qu'au-delà des volumes de temps d'accès, la qualité des sources est fondamentale. Tout dépend des performances des équipements. D'ailleurs, il pourrait s'avérer

nécessaire de repenser le LURE et SOLEIL, pour atteindre le niveau de performances de l'ESRF. Cette réflexion devrait peut-être se faire au niveau européen pour atteindre, si nécessaire, des performances encore plus élevées.

M. Gilles COHEN-TANNOUDI a alors rappelé les principales conclusions de la Fondation européenne de la science quant aux besoins à moyen terme de la science européenne en rayonnement synchrotron.

En premier lieu, le panel de spécialistes de haut niveau réuni par la Fondation a conclu à la nécessité de renouveler les sources arrivées en fin de vie que sont le SRS et le LURE. En second lieu, il est indispensable, selon la Fondation, de soutenir la construction de nouvelles sources pour satisfaire les besoins futurs en temps de faisceau des différentes disciplines et en particulier de la biologie.

En définitive, la décision de ne pas construire de synchrotron supplémentaire par rapport à la situation actuelle et au surplus de ne remplacer qu'un des deux synchrotrons arrivés en fin de vie et appelés à disparaître, représentent une orientation opposée à 180 ° à l'opinion de tous professionnels de cette discipline.

M. Georges CHARPAK, à cette occasion, a rappelé que les retombées nationales d'un très grand équipement ne doivent pas être surestimées, si l'on en croit M. Pierre PAPON, et qu'en l'occurrence, la Fondation européenne de la science n'est pas dispensatrice de la "*parole sacrée*", d'autres opinions méritant tout autant d'être prises en considération.

Un débat s'est engagé à cet instant sur les retombées des très grands équipements.

M. Pierre POINTU a indiqué que toutes les études économiques sur l'incidence d'un très grand équipement scientifique sur le développement économique local sont positives. Pour **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, et **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, il est incontestable que l'ESRF, par exemple, a contribué au développement régional, en amont par les commandes passées aux entreprises locales, et en aval avec l'essaimage d'entreprises de haute technologie. Au demeurant, ce thème devra être traité dans le rapport. **M. Guy OURISSON**, Président de l'Académie des Sciences, à cet égard, a cité l'étude faite par l'université de Strasbourg sur les retombées économiques positives du CERN.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a pointé les divergences d'opinion entre les experts comme M. Jochen SCHNEIDER qui constatent que de nouvelles disciplines se développent à proximité d'un synchrotron grâce à la liberté d'accès à ses lignes de lumière à tout moment ou presque, et ceux qui considèrent que le facteur critique est l'utilisation des faisceaux, et rien d'autre.

M. Jean-Pierre CHANGEUX a confirmé que, dès que les biologistes disposent d'un cristal de très petite taille, leur souci est de le tester sur une ligne de lumière où quelle soit, la "*rapidité d'accès*" aux lignes étant donc très importante. Compte tenu de la lenteur du processus de cristallisation, les résultats préliminaires ont en effet une grande importance et permettent de refaire les expérimentations sans perte de temps.

Certes au départ, la cristallographie s'est développée sans grands équipements. Mais ceux-ci ont enrichi le tissu scientifique et devraient permettre, dans l'idéal, de multiplier les interfaces entre la biologie et la physique. Au reste, de nouvelles méthodes sont indispensables pour résoudre les structures des protéines non cristallisables, comme les protéines membranaires. De nouveaux champs d'étude vont se développer dans le domaine de la biologie où de nouveaux grands équipements devraient apporter des résultats intéressants, comme par exemple sur les mini-cristaux.

M. Guy OURISSON a confirmé que les biologistes produisent souvent des cristaux fragiles et de faible durée de vie, dont la fabrication est de surcroît difficile à planifier. Ainsi, "*la destinée d'une protéine est de ne pas être cristallisée*". La rapidité et la souplesse d'accès, à tout moment, à un synchrotron sont donc des paramètres essentiels pour la biologie, au contraire des autres disciplines.

En tout état de cause, selon **M. Jean-Pierre CHANGEUX**, le processus de décision doit, si les besoins en rayonnement synchrotron ne sont pas satisfaits et s'il faut dès lors un nouvel équipement, privilégier la construction au niveau européen de machines les plus performantes possibles.

Pour **M. Guy OURISSON**, l'accès à un équipement international doit être garanti par des procédures rigoureuses, faisant appel à une évaluation préalable des projets par un comité de sélection international. Au reste, la localisation de la source, que celle-ci se trouve à Paris, Grenoble ou Hambourg, ne semble pas un "*frein*" à des équipes comme celles du Professeur Dino Moras de l'université de Strasbourg.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI est ensuite revenu sur la question de la rapidité d'accès à l'instrument. Celle-ci n'est pas conditionnée que par la localisation mais également par la longueur de la file d'attente. Il existe en effet des goulots d'étranglement et rien ne peut compenser le fait qu'un schéma à un synchrotron ne peut offrir que la moitié des lignes d'un schéma à deux synchrotrons qui permettront une rapidité d'accès plus grande, où qu'ils soient.

M. Jean GALLOT, faisant référence à l'exposé de **M. Vincent MIKOL** lors d'une séance précédente, a estimé, à son tour, que la proximité et la vitesse d'accès grâce à des créneaux libres sont certes des raisons importantes qui militent en faveur de l'implantation d'un synchrotron sur le sol national mais que l'effet de structuration économique et scientifique d'un tel équipement est un autre élément capital.

Il n'est pas indifférent, en effet, que l'implantation du futur synchrotron ait lieu en France, en Grande-Bretagne, en Allemagne ou en Suède, pour les multinationales qui décident du lieu d'implantation de leurs laboratoires. La présence de l'ESRF à Grenoble a justifié le choix de cette région par différentes entreprises. En réalité, même si un grand instrument est européen, sa localisation a une portée économique considérable et une portée scientifique tout aussi importante sur les communautés scientifiques nationales.

M. Georges CHARPAK a ensuite estimé qu'il se dessine à l'heure actuelle, ainsi que M. René PELLAT l'a indiqué, un schéma comportant non pas deux machines identiques mais une machine dédiée à la biologie, en l'occurrence DIAMOND, et une autre machine optimisée pour les physiciens et les chimistes qui serait "*quatre fois moins chère*" pour une énergie de 1,5 GeV.

On pourrait même envisager de construire cette machine au LURE, en le dotant d'un nouvel injecteur, ce qui, avec d'autres mises à niveau, permettrait de parvenir à un synchrotron de 1,5 GeV "*superperformant*" et constituerait, à n'en pas douter, une solution rationnelle. De par l'acquisition par la France de 7 lignes de lumière qui, au demeurant ne seraient pas allouées exclusivement à la biologie, DIAMOND perdrait son caractère exclusivement britannique. Il serait en outre possible d'intéresser l'Espagne à la construction de la machine française.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a observé à cette occasion que si le Parlement s'est saisi de la question d'un nouveau synchrotron, il convient d'être objectif et d'explorer toutes les solutions, le temps des conclusions n'étant pas encore arrivé. La grandeur de la démarche de l'Office est, dans ce cas comme toujours, d'être à l'écoute

de toutes les suggestions, puis de déterminer la meilleure solution pour la communauté scientifique française. Quant à une machine dédiée venant compléter les lignes acquises sur DIAMOND, il faut à tout prix éviter qu'il s'agisse d'un lot de consolation attribué pour "*faire plaisir*" aux utilisateurs français. La "*rigueur*" dans l'analyse est à la base de la grandeur de la démarche de l'Office dans ce dossier difficile.

Pour terminer sa communication, **M. Jean-Pierre CHANGEUX** a fait le constat que les exigences des différentes disciplines scientifiques ne sont pas les mêmes, en particulier celles de la cristallographie pour la biologie et celles de la physique du solide. La biologie nécessite en tout état de cause un accès rapide aux lignes de lumière les plus performantes possibles, la proximité du synchrotron par rapport aux utilisateurs étant un avantage décisif. Au vrai, compte tenu de la spécificité des besoins de la biologie, il convient peut-être de vérifier si le concept d'un équipement multidisciplinaire correspond toujours à la situation.

Les Rapporteurs ont, à ce stade de la réunion, passé la parole à M. Yves FARGE, conseiller de Mme Catherine BRÉCHIGNAC, directeur général du CNRS.

*

M. Yves FARGE a commencé son exposé en rappelant que de 1971 à 1980, il a été le premier directeur du LURE et a présidé la commission chargée de concevoir, de 1978 à 1986, l'ESRF, le synchrotron européen de haute énergie de Grenoble dont le bilan est un "*vrai succès*".

Lors des débats du milieu des années 1970 sur la stratégie à adopter en matière de rayonnement synchrotron, il apparaissait que la demande de temps de faisceau allait croître rapidement. Les besoins en rayons X seraient, dès lors, satisfaits par l'ESRF, une machine de 5 GeV spécialement conçue à cet effet, tandis que les autres besoins de la communauté scientifique française seraient satisfaits avec le synchrotron Super ACO destiné à remplacer l'anneau DCI.

En fait, ce qui n'avait pas été prévu à cette date, c'était "*l'explosion de la demande*". De fait, il est apparu impossible de fermer DCI, en raison d'une demande considérable de temps d'accès.

A titre d'exemple du progrès technique intervenu dans ce domaine, une expérimentation – théorique – qui aurait pris 15 mois avec un tube à rayons X classique, pourrait être réalisée en 10 heures sur DCI et en une milliseconde à l'ESRF. La révolution du rayonnement synchrotron,

avec un gain en brillance de 1000 milliards de fois par rapport à la technologie précédente, n'est comparable à aucune autre, hormis peut-être celle des lasers, dont les dimensions sont toutefois incomparablement plus petites et les délais de mise en œuvre plus rapides.

Une question souvent soulevée doit recevoir une réponse sans ambiguïté : les besoins en qualité de rayonnement synchrotron diffèrent-ils d'une discipline à l'autre ?

Ceci n'est vrai en aucune manière. La qualité des faisceaux demandés par la physique comme par la biologie ou la chimie est absolument la même.

En tant que président du premier conseil SOLEIL, M. Yves FARGE a ensuite rappelé la genèse de ce projet.

En mars 1997, un comité stratégique piloté par le Secrétariat d'Etat à la recherche et ne comprenant pas d'utilisateurs du rayonnement synchrotron, conclut à la nécessité d'une nouvelle machine pour les chercheurs français. Le CEA et le CNRS sont alors invités par le Secrétaire d'Etat à la recherche, M. François d'AUBERT, à réaliser un avant-projet détaillé. En mars 1998, le Conseil supérieur de la recherche et de la technologie rend un avis favorable au projet SOLEIL. A la mi-1999, l'équipe de l'avant-projet SOLEIL est dissoute, une fois détaillées les spécifications de celui-ci, alors que les appels d'offres peuvent techniquement être lancés pour les travaux de génie civil.

Le ministre de la recherche, M. Claude ALLEGRE, demande ensuite à M. Yves FARGE de lui établir un rapport sur les besoins en rayonnement synchrotron, rapport qu'il lui sera impossible de lui présenter de vive voix.

Quelles sont les principales conclusions de cette étude, qui résulte de nombreuses consultations et de nombreux déplacements ?

Le premier enseignement majeur est que la demande de temps de faisceau va se déplacer vers les rayons X. Par rapport à la situation au LURE, où les demandes se répartissent pour moitié entre les rayons X proprement dits et les rayons X "*mous*", à l'avenir les demandes porteront à 70 % sur les rayons X proprement dits et à 30 % sur les rayons X "*mous*".

La raison fondamentale de cette évolution est que toutes les disciplines font un appel croissant à des rayonnements qui puissent pénétrer dans

la matière condensée (solide ou liquide), ainsi par exemple la métallurgie de transformation de l'aluminium par usinage à chaud.

La conclusion fondamentale de cette évolution est qu'un synchrotron dédié de basse énergie, construit en France pour compléter, à moindre coût, l'achat de lignes de lumière sur DIAMOND, ne satisferait que 30 à 35 % des besoins de la communauté scientifique française.

Le deuxième enseignement fondamental de l'étude réalisée par M. Yves FARGE est la croissance, quelle que soit la discipline considérée, de la demande en rayonnement synchrotron produit par des machines de 3^{ème} génération.

Dans le domaine de la biologie, les limites d'un synchrotron comme DCI apparaissent désormais clairement. Or l'après-génome sera incontestablement le temps de la structure des protéines, de sorte que l'on peut prévoir, dans les 20 ans à venir, une multiplication par 3,5 de la demande en rayons X.

La recherche appliquée liée à l'industrie devrait voir ses besoins croître d'un facteur 1,8, tandis que les besoins des sciences de l'univers augmenteraient d'un facteur 2,2.

La recherche appliquée connaît actuellement une augmentation forte de sa demande que l'on peut vérifier au LURE comme à l'ESRF où elle représente 20 % des utilisateurs de ces équipements. Tous les domaines sont concernés, depuis l'analyse structurale pour les cosmétiques (l'Oréal), jusqu'aux techniques d'étude de l'adhésion de films polymères sur l'aluminium, en passant par la métallurgie de la transformation de l'acier et de l'aluminium.

Dans ces types de recherche, 70 % des industriels sont associés à des équipes universitaires, dans le cadre de projets de recherche amont, publiés et bénéficiant d'un accès gratuit aux synchrotrons. L'autre cas de figure est celui de recherches propriétaires, le temps de faisceau étant alors payé par l'industriel.

Il faut noter à cet égard que l'industrie exprime une demande de plus en plus forte pour l'accès à des faisceaux de rayons X qui, seuls, permettent des analyses en volume, les rayons X "mous" qui servent surtout à l'étude des surfaces ou des gaz étant moins demandés qu'auparavant.

A cet égard, il apparaît qu'un synchrotron de 1,5 GeV serait de fait optimisé pour les analyses de surface, tandis qu'une machine de 2,5 à

2,75 GeV pourrait convenir aussi bien pour les analyses en volume qu'en surface.

En définitive, la croissance de la demande devrait s'établir à 80 % dans les 20 ans à venir, après avoir atteint 100 % entre 1986 et 1998. Le léger ralentissement prévisible provient de ce que l'ouverture de nouveaux synchrotrons a été massive dans les années récentes, ce qui a conduit à une multiplication des projets soumis aux comités de programme et aussi à des taux de rejet importants en raison d'une méconnaissance de la qualité requise pour ces projets, un phénomène qui devrait s'atténuer à l'avenir en raison d'une meilleure information sur les exigences de niveau pour l'accès au rayonnement synchrotron.

En tout état de cause, les discussions actuelles sur des nouvelles ressources en rayonnement synchrotron prennent comme hypothèse que le nombre d'utilisateurs sera constant ou en faible croissance à l'avenir. Il s'agit là d'une erreur totale, car l'expérience montre que le nombre d'utilisateurs croît toujours lorsque des techniques d'analyse nouvelles sont mises au point, ce qui ne va pas manquer de se produire.

Pour autant, peut-on considérer que le parc européen actuel de synchrotrons complété par les machines actuellement en construction suffirait à satisfaire les besoins des chercheurs français ?

A cet égard, il faut impérativement distinguer les lignes de lumière sur section droite, les plus intéressantes, des lignes de lumière sur aimant de courbure, dont les performances sont largement inférieures.

Or, il n'existe aucune section droite disponible sur le synchrotron italien ELETTRA de Trieste. Il serait éventuellement possible, sous réserve de confirmation, d'acquérir 2 sections droites à BESSY II à Berlin, et 1 ou 2 supplémentaires sur le synchrotron SLS de Villigen en Suisse. Au total, on atteindrait donc 3 ou 4 lignes en section droite, qui viendraient s'ajouter aux 7 lignes en négociation sur DIAMOND. Or il s'agit bien de remplacer les 42 lignes de lumière du LURE.

Alors que le programme de remplacement du LURE par SOLEIL et de SRS (Daresbury) par DIAMOND, conduit, en Europe, à une situation satisfaisante pour les lignes de lumière sur aimant de courbure et à une situation tout juste acceptable pour les sections droites, il est manifeste que l'actuel projet du ministère conduit directement à la pénurie.

La source SRS de Daresbury est utilisée par 2000 chercheurs, de même que le LURE. Si la construction de DIAMOND était seule

décidée, alors la capacité de prise en charge passerait de 4000 utilisateurs à 2400, dans une conjoncture où l'industrie n'a pas encore perçu la puissance des méthodes d'analyse en volume fournies par le rayonnement synchrotron dans les longueurs d'onde correspondant aux rayons X.

Toute solution ne prévoyant la construction que d'un seul synchrotron en substitution au LURE et à SRS, ne peut donc en aucun cas convenir, car elle aurait pour conséquence une diminution de 40 % des capacités disponibles.

En outre, selon M. Yves FARGE, le débat sur les coûts de différentes solutions en compétition, doit être lancé. En utilisant les méthodes de calcul de retour sur investissement en vigueur dans l'industrie, il apparaît que *"le retour vers la Nation de l'investissement réalisé dans l'ESRF couvre totalement les dépenses du LURE"*. Avec une marge d'erreur de 10 à 20 %, l'analyse économique démontre la viabilité d'un très grand équipement comme SOLEIL, ce que les élus locaux ont vérifié à plusieurs reprises dans d'autres cas. En tout état de cause, pour le Trésor public, en prenant en compte les recettes fiscales et sociales, la solution SOLEIL est la plus compétitive.

Enfin, en terme de calendrier, la solution présentée par le ministère ne paraît pas plus convaincante. Pour SOLEIL, le premier *"coup de pioche"* pourrait être donné dans 2 à 3 mois. Au contraire, l'acquisition de lignes sur DIAMOND nécessite des négociations de ministère à ministère et au final un accord intergouvernemental, dont la finalisation ne pourrait prendre moins de 2 ans, à compter de la signature du *"memorandum of understanding"*. Enfin, il n'existe pas pour DIAMOND d'avant-projet détaillé, dont il faut rappeler qu'il a pris deux et demi à réaliser pour SOLEIL. Au minimum, on peut donc considérer qu'il s'écoulera 3 ans entre la signature du *"memorandum"* et le premier coup de pioche pour DIAMOND.

Pour M. Yves FARGE, il faut donc retourner la situation et ouvrir le projet SOLEIL au Royaume Uni, puisque la France pourra être prête 3 à 4 ans avant ce dernier. De plus, l'équilibre financier du projet est encore amélioré par la demande de l'Espagne d'entrer à hauteur de 10 % dans le projet SOLEIL et par le souhait de la Norvège d'acquérir 1 ou 2 lignes de lumière.

Pour terminer, M. Yves FARGE est revenu sur la question du niveau d'énergie d'un synchrotron moderne. L'énergie de SOLEIL a été fixée à 2,5 GeV puis réévaluée à 2,75 GeV pour être *"confortable"* dans la gamme des rayons X. Ainsi cette machine satisfera tant la demande

d'analyses de surface ou de gaz réalisées avec des rayons X " *mous* " que celle d'analyses en volume effectuées avec des rayons X. S

Si un seul nouveau synchrotron devait être construit au Royaume Uni pour les rayons X, on serait d'ores et déjà " *court* " pour satisfaire les besoins actuels et donc dans l'incapacité totale de satisfaire les nouveaux besoins. Or la croissance de la demande de temps de faisceau ne va pas s'arrêter en l'an 2000.

*

Dans la discussion qui a suivi l'exposé de M. Yves FARGE, **M. Jean-Pierre CHANGEUX** a jugé que toute réflexion sur les synchrotrons doit commencer par un bilan des résultats scientifiques obtenus par leur entremise, une telle démarche valant aussi pour les autres très grands équipements. En tout état de cause, il convient de vérifier que l'allocation des fonds publics investis dans ces installations est optimale.

Au demeurant, il faut bien constater qu'avec un potentiel scientifique équivalent, l'Europe dispose de 17 synchrotrons contre 12 aux Etats-Unis. Cet écart est encore plus important pour les sources de 3^{ème} génération, dont, à terme, l'Europe possèdera 6 exemplaires contre 3 aux Etats-Unis.

Mais au final, les investissements dans les très grands équipements doivent être comparés aux crédits octroyés aux sciences de la vie, avec la nécessité de réintégrer dans les premiers la part des crédits alloués aux sciences de la vie mais préaffectés aux grands équipements.

A ces différentes observations, **M. Yves FARGE** a répondu en premier lieu que les travaux réalisés sur le LURE et l'ESRF conduisent chaque année à 1750 publications environ réalisées non pas à la suite d'une seule expérience, comme souvent au CERN, mais à la suite de nombreuses expérimentations conduites par 600 équipes différentes en moyenne.

Quant à l'affirmation selon laquelle les très grands équipements (TGE) consomment une part très importante des crédits de la recherche, les rapports du Comité des très grands instruments présidé par M. Pierre AIGRAIN montrent que les dépenses qui leur sont consacrées n'ont pas augmenté pendant toute la durée des travaux de ce comité, c'est-à-dire jusqu'en 1997 et qu'au contraire, elles ont augmenté depuis que le comité a été dissout, ce qui contredit l'idée selon laquelle celui-ci constituait un lobby très efficace. En tout état de cause, l'affirmation

selon laquelle les crédits des TGE auraient augmenté de 40 %, est erronée.

M. Jean-Pierre CHANGEUX s'est une nouvelle fois élevé contre le pouvoir institutionnel de la physique et a défendu au contraire le développement des interfaces entre les disciplines. Non "*pas hostile au développement des synchrotrons, bien au contraire*", à condition qu'il se fasse en collaboration entre la physique et la biologie, **M. Jean-Pierre CHANGEUX** s'est déclaré opposé à ce que les très grands équipements bénéficient d'une priorité budgétaire au détriment des sciences de la vie. En définitive, ce qu'il convient de faire, c'est de développer les possibilités d'instrumentation pour la physique et les interfaces entre celle-ci et les autres disciplines, tout en comparant la situation de l'Europe avec celle des Etats-Unis dans le domaine particulier des synchrotrons.

A cet égard, **M. Yves FARGE** a remarqué qu'il existe une grande différence entre l'Europe et les Etats-Unis en ce qui concerne les lignes de lumière. Le Japon étant mis à part en raison des capacités financières exceptionnelles de ses industriels, les Etats-Unis se caractérisent par le financement d'une part très importante de la recherche industrielle par le *Department of Defense*. Même s'il n'existe pas en Europe de coordination des investissements dans les synchrotrons, une certaine optimisation de facto s'est réalisée en particulier avec la construction de l'ESRF et le programme "*Access to Large Facilities*" de l'Union européenne.

Au demeurant, la mesure de la rentabilité des crédits budgétaires par le nombre de publications scientifiques obtenues est une méthode qui doit être appliquée à l'ensemble des disciplines scientifiques et non pas seulement aux très grands équipements.

On peut par ailleurs considérer que la répartition des rôles entre la recherche clinique, le CEA et le CNRS est loin d'être optimale dans le domaine des sciences de la vie. Par ailleurs, s'agissant de cette dernière discipline au CNRS, si les crédits internes ont effectivement diminué en valeur relative depuis les années 1970, de nouvelles sources de financement sont venues prendre le relais, la répartition étant désormais égale entre les crédits internes, les crédits d'enseignement et les crédits sur contrat, soit un tiers du total pour chacune des trois catégories de ressources.

En tout état de cause, on ne peut dire que la physique ait monopolisé les crédits internes au CNRS, puisque aussi bien, les crédits de l'IN2P3 ont diminué de 40 % en 10 ans.

A ce stade de la discussion, **M. Claude COHEN-TANNOUJJI**, Professeur au Collège de France, Prix Nobel, a fait remarquer que si l'on prend l'exemple de son laboratoire de l'Ecole normale supérieure, dont les crédits de fonctionnement hors salaires ne dépassent pas 500 000 F par an, il est impossible d'affirmer que la physique monopolise les crédits de la recherche dans notre pays.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, remarquant qu'il serait utile de découvrir l'origine dans notre pays des tensions entre disciplines scientifiques, a posé à M. Yves FARGE, la question de savoir s'il serait envisageable de placer un futur synchrotron sous un statut indépendant, contrairement au LURE, laboratoire co-administré par le CNRS, le CEA et le ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie.

En premier lieu, **M. Yves FARGE** a indiqué que la gestion directe d'un très grand équipement par le ministère de la recherche lui paraît à la fois inadéquate et dangereuse, tous les pays étant d'ailleurs dotés d'un système tampon dans ce domaine. S'agissant de la structure juridique et de l'organisation d'un synchrotron, M. Yves FARGE a remarqué d'une part que ce sont le CNRS et le CEA qui sont actionnaires de l'ESRF et d'autre part que le projet SOLEIL a prévu d'associer plusieurs actionnaires, français avec le CEA et le CNRS, et étrangers avec l'Espagne et la Norvège. En toute hypothèse, il est dangereux de séparer les très grands équipements de leurs utilisateurs, les communautés scientifiques devant au contraire être impliquées dans le fonctionnement du synchrotron.

A cette occasion, **M. Pierre POINTU** a estimé indispensable de revenir sur le calcul de rentabilité de l'investissement que constitue un synchrotron et d'appliquer, comme l'a proposé M. Yves FARGE, les méthodes qui sont appliquées dans les entreprises pour opérer une sélection entre plusieurs projets et qui permettent de sortir du piège des raisonnements exclusivement économiques ou budgétaires.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur a alors confié à MM. FARGE et PAPON le soin d'examiner les différents projets à la lumière des méthodes micro-économiques de retour sur investissement qui peuvent apporter un éclairage complémentaire aux méthodes traditionnelles.

Les Rapporteurs ont ensuite donné la parole à M. Claude COHEN-TANNOUJJI, Professeur au Collège de France, Prix Nobel, afin qu'il veuille bien leur donner son appréciation de la situation française dans le domaine du rayonnement synchrotron.

*

M. Claude COHEN-TANNOUDJI a précisé que, s'il n'est pas un utilisateur ni un spécialiste du rayonnement synchrotron, la question de nouvelles sources de rayonnement l'intéresse tout particulièrement. Les lasers, longtemps demeurés une curiosité, ont entraîné des bouleversements considérables en recherche fondamentale et des applications nombreuses dans la vie quotidienne. En tout état de cause, il faut rester attentif au développement scientifique qui peut susciter des percées quantitatives rapides. La mise au point de nouvelles sources d'UV et de rayons X voire la mise au point de lasers à rayons X se prêtent à l'évidence à de nombreuses applications nouvelles.

Pour autant, M. Claude COHEN-TANNOUDJI, qui n'est pas utilisateur de très grands instruments, est conscient de l'insuffisance des crédits de fonctionnement des laboratoires.

En cumulant les apports du CNRS, ceux de l'Ecole normale supérieure et ceux du Collège de France, les crédits de son laboratoire, même après l'obtention de son Prix Nobel, culminent à 500 000 F par an, hors salaires, en crédits récurrents de fonctionnement pour ses 20 chercheurs, un budget heureusement complété par des contrats de recherche comme par exemple sur les horloges spatiales.

Dans ces conditions, M. Claude COHEN-TANNOUDJI approuve et soutient les actions du ministre de la recherche en faveur des jeunes chercheurs et des petits laboratoires ainsi que celles tendant à la création de nouvelles équipes par de jeunes scientifiques encouragés dans cette voie par le mécanisme de "*l'action incitative blanche*".

M. Claude COHEN-TANNOUDJI a par ailleurs, regretté les tensions entre physiciens et biologistes, tensions qu'il estime "*artificielles*". Loin d'être "*impérialiste par rapport à la biologie*", il a au contraire encouragé deux chercheurs de son laboratoire qui en avaient émis le souhait, à s'orienter vers la biophysique.

Mais, estimant devoir rester attentif à la question du synchrotron, M. Claude COHEN-TANNOUDJI a indiqué qu'en dépit de la suppression regrettable du Conseil des grands instruments par le ministre, il souhaite obtenir des réponses sur les points de savoir si le budget des très grands équipements a augmenté ou diminué dans les années récentes et, au final, s'il est plus élevé ou moins élevé que dans les autres pays.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a confirmé à cet égard, qu'après avoir traité de la question du synchrotron, l'Office entendait se forger une vision globale sur les très grands équipements, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, précisant quant à lui que les crédits alloués aux très grands équipements ont diminué dans la loi de finances pour 2000.

A cet égard, **M. Claude COHEN-TANNOUDJI** a estimé qu'il est indispensable de comparer les très grands instruments entre eux, notamment en ce qui concerne les crédits qui leur sont alloués. En toute hypothèse, si la suppression d'un très grand équipement devait être envisagée, il serait nécessaire de déterminer quelle communauté scientifique serait atteinte par cette suppression.

A cet égard, peut-on dire que le synchrotron devrait être le dernier grand équipement à supprimer ? Sans doute, car un synchrotron dessert de nombreux utilisateurs.

Considéré comme un rayonnement parasite lorsqu'on l'a mis en évidence pour la première fois, le rayonnement synchrotron a très vite été identifié comme une source utile de rayons UV et de rayons X. Des progrès technologiques considérables ont permis ensuite d'atteindre des brillances supérieures d'un facteur égal à 1000 milliards à celle des tubes à rayons X classiques. Aujourd'hui, avec un gain de 12 ordres de grandeurs, le rayonnement synchrotron représente un acquis de la recherche moderne, même s'il reste des progrès à faire pour les détecteurs.

Au demeurant, le rayonnement synchrotron ne peut être dissocié ni de la résonance magnétique nucléaire ni de la résonance paramagnétique électronique. Même si ces techniques sont appelées à de nouvelles applications, il s'agit là d'outils d'analyse complémentaires.

S'agissant des besoins de la recherche française en rayonnement synchrotron, les utilisateurs se trouvent dans 500 à 600 équipes de recherche. Un synchrotron est donc par essence différent d'un très grand instrument comme le CERN. Il s'agit au contraire d'un instrument qui, servant à plusieurs centaines d'équipes, apporte un "*soutien aux petits laboratoires*". Au surplus, les synchrotrons favorisent la recherche interdisciplinaire, en rapprochant les physiciens, les biologistes et les chercheurs de l'industrie, ces derniers étant tout particulièrement heureux de travailler sur un tel grand instrument car ils y trouvent souvent des réponses à leurs interrogations scientifiques.

M. Claude COHEN-TANNOUDJI a estimé en conséquence que les différentes solutions en présence pour l'avenir du rayonnement synchrotron dans notre pays doivent être examinées "*d'une manière sereine*". La solution DIAMOND est-elle viable ? Faut-il garder le LURE ? Le projet SOLEIL apporte-t-il des réponses adaptées aux besoins ? Dans le cas de la solution DIAMOND, le nombre de lignes dont on veut faire l'acquisition est-il suffisant ? Est-il possible de trouver des lignes additionnelles en Suisse, en Italie et en Allemagne, ou, au contraire, les installations correspondantes sont-elles déjà saturées ?

Au surplus, "*pourquoi tant de pays ont-ils décidé de posséder une machine nationale ? Pourquoi existe-t-il dans le monde un seul synchrotron dont le statut soit international, à savoir l'ESRF ? Pourquoi des pays comme Taiwan ou la Corée ont-ils décidé de se doter de leur propre synchrotron ?*"

"Pouvons-nous, en France, nous passer d'une source nationale ?"

Au final, il est d'une importance critique de déterminer si la solution DIAMOND suffit à elle seule, ou au contraire, si c'est à la fois DIAMOND et SOLEIL qui sont à la mesure des besoins futurs.

A toutes ces questions, il faut des réponses précises.

Au reste, M. Claude COHEN-TANNOUDJI, dont la moitié des chercheurs de son équipe sont d'origine étrangère, a estimé qu'il était, en ce qui le concerne, parfaitement convaincu de l'importance de la collaboration internationale dans le domaine de la recherche.

L'importance de la collaboration internationale ne signifie pas cependant qu'il n'est pas parfois "*nécessaire d'avoir des moyens nationaux quand le domaine est prioritaire ou stratégique*". Une solution préférable serait sans doute d'insérer mieux encore SOLEIL dans le contexte international.

En conclusion, M. Claude COHEN-TANNOUDJI a appelé tous les protagonistes du débat à être "*responsables*".

Si l'on critique le fonctionnement du LURE par rapport à celui de l'ESRF dont les heures de fonctionnement sont plus étendues, il faut prendre en considération les contraintes statutaires respectives des deux installations. Par ailleurs, si une gestion satisfaisante du futur synchrotron le commande, il ne faut pas hésiter à changer de statut pour parvenir à exploiter la machine 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7.

Enfin, si la question du synchrotron doit être examinée dans le calme et la sérénité, il est indispensable qu'il existe un débat à ce sujet dans les laboratoires : *" il faut un débat ouvert, accessible à tous, sérieux et responsable, un débat qui précède et non pas suive la décision sur ce sujet "*.

M. Jean-Pierre CHANGEUX ayant indiqué que l'ampleur des sommes consacrées aux très grands équipements pouvait expliquer l'insuffisance de crédits de fonctionnement de laboratoires comme celui de **M. Claude COHEN-TANNOUDJI**, celui-ci a remarqué qu'il n'est pas le moins bien doté. Souhaitant ne pas opposer les communautés scientifiques, **M. Jean-Pierre CHANGEUX** a plaidé en faveur du développement des interfaces entre disciplines.

M. Claude COHEN-TANNOUDJI a alors fait état des propos de M. Max PERUTZ, Prix Nobel de biochimie, qui, dans une lettre rendue publique, a qualifié de *" décision tragique "* et de *" mauvais coup porté à la science européenne "* l'abandon de SOLEIL.

Pour **M. Jean-Pierre CHANGEUX**, les crédits alloués aux très grands équipements doivent être gérés d'une manière *" harmonieuse "*, respectueuse des intérêts de toutes les disciplines. Certes, ainsi que l'indique M. Max PERUTZ, la cristallographie est une discipline fondamentale de grand avenir. Mais l'aspect politique de la répartition des masses budgétaires ne peut être négligé, et, au demeurant, l'existence de 17 synchrotrons en Europe, contre 12 à 13 aux Etats-Unis pose une question politique.

M. Claude COHEN-TANNOUDJI a rappelé que la part des dépenses de recherche et développement dans le PNB atteint 2,8 % aux Etats-Unis et au Japon, contre 1,8 % en Europe, ce qui traduit un retard incontestable.

Concernant cette statistique, **M. Guy OURISSON** a estimé qu'il faut se méfier des comparaisons arithmétiques en la matière, une disparité constatée avec un tel indicateur étant davantage un indice qu'une preuve.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI est ensuite revenu sur l'impact scientifique du LURE et de l'ESRF. S'agissant de ce dernier équipement, M. Yves PETROFF, son directeur général, a indiqué que la proportion de projets scientifiques français sélectionnés par le comité de programme international, est supérieure, dans le total de projets acceptés, à la part française dans le financement de l'installation. Le même constat peut se faire pour le LURE, dont les liens avec l'ESRF

sont d'ailleurs étroits. Ceci établit sans contestation la compétitivité des équipes françaises.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur ayant remarqué que s'agissant des lignes de lumière, il faut distinguer dans les comparaisons relatives à l'Europe et aux Etats-Unis, entre les lignes sur sections droites et les lignes sur aimant de courbure, **M. Yves FARGE** a indiqué qu'il allait faire parvenir aux Rapporteurs, un tableau comparatif détaillé à cet égard.

M. Georges CHARPAK, à ce stade de la discussion, a rappelé que l'on est confronté à des "*propositions nouvelles*", par rapport à l'idée de base de deux machines de 2,5 GeV, construite l'une en France et l'autre au Royaume Uni.

Il est "*évident*" qu'un tel schéma n'est pas optimisé pour l'ensemble des deux pays. Un autre schéma de construction pourrait apparaître plus favorable, à savoir celui d'un synchrotron de 2,5 GeV en France et d'une machine de 1,5 GeV, "*quatre fois moins chère*", implantée ailleurs, pourquoi pas au Royaume Uni, avec, au surplus, un financement européen.

En réalité, dans les propositions actuellement examinées par le groupe de travail, il s'agit d'un synchrotron de 3 GeV au Royaume Uni et d'une machine ultra-moderne de 1,5 GeV. En l'occurrence, les chercheurs anglais viendraient en France utiliser cette machine non optimisée pour la biologie, tandis que les chercheurs français effectueraient leurs travaux de biologie structurale en Angleterre. Il s'agit d'une proposition "*nouvelle et incontournable*".

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur a tenu à souligner qu'effectivement ce schéma a été exposé au groupe de travail mais que des experts comme M. Jochen SCHNEIDER, directeur du Hasylab, ont mis en doute la possibilité de diminuer le coût du synchrotron de 1,5 GeV d'un facteur 4, même en réutilisant des équipements du LURE, une fois celui-ci fermé.

M. Georges CHARPAK est alors convenu que le recyclage d'équipements anciens n'apporterait vraisemblablement que des économies négligeables mais qu'il est possible d'optimiser la dépense globale britannique et française en faisant un choix rationnel des énergies des deux machines.

M. Yves FARGE, à ce moment, a reposé le problème quantitatif du nombre d'utilisateurs.

Le synchrotron britannique de 3 GeV devrait pourvoir aux besoins d'environ 2 400 utilisateurs, et la machine française de 1,5 GeV à ceux de 4 à 500 utilisateurs. En raison de la multiplication des applications du rayonnement synchrotron, le nombre de lignes apparaîtra vite comme insuffisant. Deux facteurs sont à considérer à cet égard, d'une part la croissance globale du nombre d'utilisateurs et d'autre part la répartition des besoins en rayons X et en rayons X " mous ", qui va évoluer d'une situation d'égalité pour les deux gammes de longueur d'onde à une part de 70 % pour les rayons X et de 30 % pour les X " mous ".

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur s'est en conséquence interrogé sur l'adéquation de SOLEIL aux besoins tels qu'ils sont connus aujourd'hui.

Si les concepteurs de SOLEIL devaient concevoir à présent un nouveau synchrotron, le referaient-ils identique à ce dernier ? Sans doute, certains choix peuvent-ils apparaître comme trop sophistiqués ou au contraire inadaptés aux besoins actuels, de sorte que les Rapporteurs se doivent de pointer les évolutions nécessaires.

Pour **M. Yves FARGE**, il n'existe " aucune raison de dire que SOLEIL n'est plus actuel ". Achevé en juin 1999, l'avant-projet détaillé a, au contraire, intégré toutes les évolutions techniques et a subi une amélioration permanente, tout au long de sa conception. Au reste, il n'existe aucune solution alternative meilleure que SOLEIL, ce qui doit conduire, en toute logique, au choix de celui-ci.

Par ailleurs, la 4^{ème} génération des synchrotrons reste " hors du champ de vision " pour des applications de routine. Il s'agit en effet pour les lasers à électrons libres de démontrer que le gain mis en évidence dans l'UV lointain s'observe également dans la gamme des rayons X. Il s'agit donc de passer de 1000 Å à 1 Å, un progrès difficile à concevoir pour le moment.

Au contraire, l'avant-projet SOLEIL, conduit par M. Jean-Louis LACLARE, l'un des meilleurs spécialistes des synchrotrons, a été validé par les meilleurs experts mondiaux, dont M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF et M. Jochen SCHNEIDER, directeur du Hasylab.

Après que l'énergie de SOLEIL a été portée de 2,5 à 2,75 GeV, il n'existe aucun élément permettant de penser que SOLEIL n'est pas adapté aux besoins exprimés.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI a, par la suite, proposé que la France se tourne vers les instances européennes afin de faire évoluer la situation.

Au reste, ainsi que l'a indiqué la Fondation européenne pour la science, il y a une nécessité de mettre en place un échelon de supervision au niveau européen. Alors que de nombreux observateurs jugent indispensable une implication du budget européen de la recherche dans le domaine des synchrotrons, les chapitres de SOLEIL consacrés à l'amélioration des techniques des lasers à électrons libres apparaissent justiciables d'une aide européenne.

En effet, il s'agit d'un pari technologique dont il serait légitime que les coûts soient partagés. En définitive, il entrerait dans la vocation de sources de financement européennes de soutenir ce type de développement, en vue de l'amélioration future des performances du rayonnement synchrotron.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, tout en saluant cette proposition, a attiré l'attention sur la nécessité de ne pas voir une aide européenne s'assortir de la perte par la France de la maîtrise de son synchrotron, y compris en ce qui concerne sa localisation.

Sur ce sujet, **M. Yves FARGE** a, par ailleurs, observé que le 5^{ème} Programme commun de recherche et développement (PCRD) vient d'entrer en vigueur et que les discussions sur le 6^{ème} PCRD ont à peine commencé. Au-delà du retard que la sollicitation des fonds européens risquerait d'entraîner, il semble que le programme actuel de mutualisation des accès aux ressources nationales, grâce au programme " *Access to Large Facilities* " soit suffisant. Au reste, la solution d'un accord intergouvernemental retenue pour l'ESRF a permis d'éviter les lenteurs des décisions de la Commission européenne. L'autocoordination intervenue dans le cadre de la Fondation européenne de la science s'est d'ailleurs révélée utile, puisque, aussi bien, c'est au sein de cette instance qu'est né le projet de l'ESRF.

S'agissant de SOLEIL, jamais projet n'a été examiné par autant d'instances et de comités différents. Il s'agit désormais de prendre une décision qui n'a que trop traîné.

Abordant la question générale des cahiers des charges des très grands équipements conduits au niveau européen, **M. Pierre PAPON** a estimé nécessaire de distinguer d'une part le financement de l'investissement qui conduit à l'attribution de quotas dans le capital de la société, et, d'autre part, le fonctionnement sur le terrain qui doit aboutir à une

coordination dans l'utilisation des lignes de lumière. Il faut également intégrer la dimension pédagogique des grands équipements et prévoir des dispositions à cet égard dans les cahiers des charges.

S'agissant de la méthode générale suivie par les Rapporteurs et leur groupe de travail, **M. Jean GALLOT** a ensuite souligné qu'il s'agit d'une approche objective qui doit s'imposer à tous et s'appliquer à toutes les personnalités auditionnées. Il semble qu'il existe, à l'heure actuelle, une proposition émanant de M. René PELLAT, responsable des négociations avec le Royaume Uni. Or, sur cette solution et en particulier sur le projet de synchrotron de 3 GeV, M. René PELLAT n'a énoncé que "*trois phrases*", avec, pour conséquence, une imprécision totale par rapport à l'avant-projet détaillé de SOLEIL. Cette méthode s'inscrit au demeurant en droite ligne de l'élimination de ce projet par un rapport secret.

S'il y a effectivement une nouvelle donne qui soit suffisamment crédible pour être prise en compte, elle doit nécessairement s'assortir d'un véritable projet et non pas être caractérisée seulement "*d'une phrase*". En l'occurrence, l'exigence d'une approche scientifique doit être respectée par tous.

M. Georges CHARPAK a indiqué à cet égard que M. René PELLAT, qui ne travaille pas seul, est au contraire assisté de M. Pascal COLOMBANI, administrateur général du CEA. Comme en témoigne par ailleurs une réunion récemment intervenue au plus haut niveau entre le CEA et le CNRS, une solution est en cours de préparation.

M. Yves FARGE s'est alors étonné de ce qu'aucun spécialiste du rayonnement synchrotron n'ait été contacté à cet effet.

S'il appartient au pouvoir politique de prendre des décisions et donc d'assumer les risques de celles-ci, on ne peut renvoyer une question urgente en commission sur des idées vagues et la traiter au total par des moyens qui ne sont que dilatoires, alors que se posent des questions précises telles que l'obsolescence du LURE et la croissance de la demande de temps de faisceau.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a confirmé que les prises de position ainsi énoncées sont enregistrées par le groupe de travail et que l'idée d'adresser un questionnaire "*homothétique*" à M. René PELLAT est retenue. En particulier, il lui sera demandé en quoi une machine de 1,5 GeV représente une économie par rapport à SOLEIL, quels sont les nombres de lignes respectifs des deux machines et

surtout en quoi un synchrotron de 1,5 GeV peut être utile à la communauté scientifique française.

Au surplus, s'il se confirmait que les besoins en rayons X "mous" devaient représenter 30 % des besoins totaux, toute autre solution que SOLEIL pour équiper la France serait absurde.

M. Georges CHARPAK a de nouveau fait valoir que dans l'hypothèse de la construction en France d'un synchrotron de 1,5 GeV, des échanges pourraient avoir lieu entre la France et le Royaume Uni de façon à porter le nombre de lignes sur DIAMOND au-delà de 7.

Au demeurant, pour se convaincre de l'intérêt d'une machine de basse énergie, M. Georges CHARPAK a conseillé d'auditionner des spécialistes des applications du rayonnement synchrotron à l'étude des surfaces, comme M. SOUKIASSIAN, du CEA, dont les vues originales ne recourent pas obligatoirement celles de sa hiérarchie. Devant la remarque de **M. Yves FARGE** sur la disproportion entre le jugement d'un scientifique, même éminent, et celui de plusieurs comités ministériels, **M. Georges CHARPAK** a indiqué que le poids de la hiérarchie pouvait conduire certains experts, y compris des membres du groupe de travail s'exprimant devant les Rapporteurs, à ne pas faire état de leur pensée profonde.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, lui ayant posé la question de la qualité scientifique des quelques 600 équipes utilisant le LURE, **M. Claude COHEN-TANNOUDI** a estimé, dans une réponse qualitative, que leur niveau est excellent, ainsi d'ailleurs que celui des équipes recourant à l'ESRF.

M. Guy OURISSON a toutefois indiqué, quant à lui, qu'une équipe de recherche comme la sienne, faisant appel au rayonnement synchrotron une fois par an, ne pouvait être considérée comme compétente dans ce domaine.

M. Claude COHEN-TANNOUDI a tenu alors à revenir sur l'aide apportée par le LURE aux petites équipes de recherche venant utiliser les synchrotrons DCI ou Super ACO.

Le LURE apparaît bien en tout état de cause comme un "laboratoire de service" où de nombreuses équipes peuvent obtenir du temps de faisceau et le mettre en œuvre d'une manière satisfaisante, même s'ils n'ont qu'une expérience limitée du rayonnement synchrotron, et ceci grâce à l'aide des chercheurs résidents.

Ce schéma de "*laboratoire de service*" est en cours de duplication dans le domaine des lasers, avec la création d'un laboratoire mixte franco-indien, soutenu par M. Claude COHEN-TANNOUDJI, qui mettra des sources de haute performance à la disposition de nombreuses équipes de recherche talentueuses mais insuffisamment dotées en équipements propriétaires de qualité.

Un synchrotron constitue aussi un "*laboratoire de service*" permettant à des équipes venant sur place d'accéder à un rayonnement de haute qualité avec l'aide de spécialistes et "*en se frottant aux autres disciplines*".

Dans ces conditions, il reste, question fondamentale, à déterminer si une machine de 1,5 GeV est obsolète ou non par rapport aux besoins.

Dans la discussion qui a suivi, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a indiqué que différents spécialistes seront consultés sur cette question, en particulier M. Jochen SCHNEIDER, directeur du Hasylab. Au reste, les indications de M. Yves FARGE sur la part de 30 % des besoins correspondant aux rayons X "*mous*" laisse perplexe sur la pertinence du choix d'une énergie de 1,5 GeV pour un futur synchrotron national.

Pour conclure, **M. Georges CHARPAK** a rejoint les opinions exprimées par **M. Jean JERPHAGNON** et **M. Gilles COHEN-TANNOUDJI**, sur l'importance stratégique de l'évaluation des besoins futurs.

Après avoir chaleureusement remercié les orateurs pour leur participation, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur** et **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, ont levé la séance.

VI – Auditions de M. Jacques FRIEDEL, de M. Paul-Henri REBUT, et de M. Edouard BREZIN et Mme Catherine BRÉCHIGNAC - mercredi 2 février 2000

En tant que Président honoraire de l'Académie des Sciences et fondateur du Conseil des grands équipements, M. Jacques FRIEDEL a été invité par **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, et **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, à exposer son point de vue sur l'importance du rayonnement synchrotron pour la recherche et les moyens de satisfaire les besoins dans ce domaine.

Ainsi que l'a précisé au préalable **M. Jacques FRIEDEL** à la demande de M. Georges CHARPAK, le Conseil des grands équipements, créé en 1979, a ralenti ses travaux dès 1996, avant d'être dissout par le ministre

de la recherche, M. Claude Allègre, sans doute peu soucieux de conserver un groupe indépendant et antérieur à sa nomination.

En tout état de cause, ce Conseil a soutenu le développement du rayonnement synchrotron en France et en particulier le projet SOLEIL, comme d'ailleurs les instances qui ont eu à en connaître.

L'intérêt de **M. Jacques FRIEDEL** pour le rayonnement synchrotron date des premières expériences du Professeur Yvette CAUCHOIS à Frascati. Quelques années plus tard, à la suggestion de M. Yves FARGE, opticien des solides et de M. Vittorio LUZZATTI, biocristallographe, il convainc M. André LAGARRIGUE, directeur de l'accélérateur d'Orsay d'ouvrir lui aussi son anneau de stockage. C'est le démarrage du LURE dont il suit les premiers développements comme Président de l'unité de 3^{ème} cycle de la Faculté des sciences d'Orsay. Il suit ensuite de plus loin le développement de l'ESRF et les discussions du SOLEIL. A la retraite depuis dix ans, il se limitera à des considérations générales sur le projet DIAMOND, sur la place des Français en rayonnement synchrotron et sur le rôle d'un centre national dans ce domaine. Ses conclusions seront que le projet DIAMOND, seul ou complété par une source dans l'UV, n'est pas adapté à la situation française actuelle et que la France possède dans les technologies du rayonnement synchrotron, des atouts qui justifient le maintien d'un centre national dans notre pays.

M. Jacques FRIEDEL pensait, il y a un an, ne pas devoir intervenir dans les discussions sur SOLEIL, estimant que c'était en dernier ressort de la responsabilité du ministre de la recherche de décider l'équilibre entre très grands équipements et soutien direct aux laboratoires. Mais le choix pris dès juin 1999 pour une participation au futur synchrotron DIAMOND démontrait à la fois un avis positif sur l'importance du rayonnement synchrotron et la volonté d'y affecter les moyens budgétaires correspondants. Les considérations suivantes ont alors conduit M. Jacques FRIEDEL à réagir aux plus hauts niveaux, à commencer par le ministre de la recherche.

L'un des avantages mis en avant pour le projet DIAMOND est celui des économies faites grâce à l'implication du Wellcome Trust. Il importe de rappeler à cet égard la participation des régions dans le projet SOLEIL, qui en allégerait le poids sur le budget de l'Etat à un niveau comparable à celui du projet DIAMOND, pour autant qu'on le connaisse.

Le projet DIAMOND est aussi présenté comme une opération européenne. C'est en fait un projet binational ou plutôt tripartite, qui regroupe trois entités à directions scientifiques, programmes et budgets

distincts. M. Jacques FRIEDEL est à l'origine d'un laboratoire fondé sur les mêmes principes, le centre des hauts champs magnétiques de Grenoble. Cette formule n'a pas été particulièrement favorable aux synergies scientifiques entre l'Institut Max Planck de Stuttgart et le CNRS de Grenoble, même dans le domaine des structures semi-conductrices où une collaboration aurait été utile.

Mais surtout le projet DIAMOND ne satisfait pas les chercheurs, qu'ils soient britanniques ou français. Dans une lettre publiée dans le Monde, le 29 novembre 1999, M. Max PERUTZ, Prix Nobel de biochimie structurale, déclare que les scientifiques d'outre-Manche regrettent l'absence de SOLEIL, qui, en démarrant quelques années avant DIAMOND, les aurait aidés à suivre la "*dynamique de développement rapide*" que connaît actuellement la biologie structurale.

Pour les biologistes français, la solution DIAMOND va à l'encontre des recommandations du récent rapport américain sur le rayonnement synchrotron (rapport Birgeneau, 1997). Pour ce rapport, il est essentiel qu'une forte proportion des recherches en biologie utilisant le rayonnement synchrotron se fasse à proximité immédiate de la source de rayonnement, pour pouvoir contrôler en cours de route les processus de cristallisation des protéines et pour pouvoir développer de nouvelles techniques sur des échantillons délicats.

Les chercheurs français, dans leur ensemble, considèrent par ailleurs avec raison que les temps d'accès offerts à la France par la solution DIAMOND sont bien inférieurs à la fois à ceux que fournirait SOLEIL et à la demande valable réelle.

On pourrait alors être tenté de compléter le dispositif DIAMOND par une petite source UV installée en France. C'était la solution envisagée en complément de l'ESRF, dès les discussions du Plan en 1979-1980. Mais cette solution n'est plus d'actualité. D'une part la demande de faisceau UV, forte au départ, a constamment décru pour atteindre 15 % du volume total aux Etats-Unis, qui possèdent pourtant des sources dédiées aux UV. La construction en France d'un synchrotron dédié aux UV ne serait donc pas d'une grande utilité. Quant à l'éventualité d'en augmenter l'énergie avec des onduleurs, elle serait presque aussi coûteuse que SOLEIL, avec des qualités de faisceau et en particulier des durées de vie bien inférieures.

Abordant le deuxième point de son exposé, M. Jacques FRIEDEL a analysé la compétitivité de la communauté scientifique utilisant le rayonnement synchrotron en France, tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

Un peu plus de 1800 chercheurs français ont utilisé en 1999 les installations du LURE et de l'ESRF. Ce nombre est comparable en proportion à celui observé aux Etats-Unis. Par ailleurs, en France, comme dans les autres pays, la physique représente à peu près 50 % du temps total, la chimie 30 % et la biologie 20 %. Pour l'avenir, les conclusions des 9 workshops récents regroupant les utilisateurs potentiels de SOLEIL, dont deux en biologie, rejoignent les études prospectives mondiales pour conclure à une croissance générale des besoins dans ces trois grands secteurs, au demeurant encore plus marquée en biologie, pour atteindre, dans les 10-20 ans, une répartition plus équilibrée. Après avoir eu une opposition de principe vis-à-vis des très grands équipements, la biologie augmentera ses temps d'accès à la fois en volume et en pourcentage, tout en restant très loin d'être l'utilisateur principal des synchrotrons.

Quant à la valeur des recherches conduites en France sur les synchrotrons, il est certes difficile de la juger du fait de la multiplicité des projets et des laboratoires impliqués. Le ministère de la recherche a émis des doutes sur la valeur générale de cette recherche, notamment au LURE, sans qu'il soit clair sur quelles bases est fondée cette impression. Il est indéniable cependant que la France a activement participé au développement de nombreuses méthodes de pointe et dans les lignes de force prospectives du rapport Birgeneau, on trouve la plupart du temps des équipes françaises de qualité impliquées.

Pour citer quelques exemples dans la physico-chimie des matériaux, c'est M. Yves PETROFF, actuel directeur général de l'ESRF, qui a mis au point au LURE, la méthode d'étude des structures de bandes électroniques par photoémission résolue angulairement. La méthode valable même dans les métaux pour des électrons assez loin du niveau de Fermi est devenue standard. Elle a permis, notamment avec des groupes du LURE et de l'ESRF, d'éliminer, par exemple, pour les supraconducteurs à hautes températures critiques, la plupart des modèles théoriques à électrons fortement corrélés.

La France a également joué un rôle de pionnier dans l'étude des changements de phase par fluctuations géantes dans les composés en chaîne ou en plan. M. Robert COMES, directeur du LURE, a ainsi, le premier, mis en évidence les diffractions X caractéristiques hors des pics de Bragg dans les conducteurs organiques. M. Jean-Pierre POUGET, l'actuel directeur de la physique au CNRS, a très largement développé ce genre d'études dont il est actuellement l'un des meilleurs spécialistes.

Les belles études de Mme Catherine BRECHIGNAC sur la structure et les excitations électroniques des agrégats métalliques ont également utilisé LURE, en parallèle avec des sources laser plus classique.

La méthode EXAFS (Extended X Ray Absorption Fine Structures) fournit des informations sur les atomes individuels dont un électron d'une couche profonde est excité. Mais elle renseigne surtout sur la nature et la structure de leur environnement atomique, grâce à l'interférence entre l'onde électronique qu'ils émettent et celle produites par réflexion sur cet environnement. Cette technique, très fine et bien adaptée à l'étude locale des surfaces a été lancée par un chercheur anglais résidant aux Etats-Unis. Lors de séjours répétés à Orsay, il a aidé LURE à l'appliquer de multiples façons, notamment en catalyse hétérogène, avec l'Institut français du pétrole. Cette technique est potentiellement transférable à la biologie.

Les noms cités montrent que, parmi les " Lurons " et leurs associés, qui se sont lancés dans les années 1970 dans l'utilisation du rayonnement synchrotron, certains au moins ont percé au plus haut niveau. M. Yves PETROFF rejoindra cette année l'université de Californie à Berkeley où il était déjà professeur et présidera l'Union internationale de physique pure et appliquée. Mme Catherine BRECHIGNAC organisera cette année en Suède un Colloque NOBEL sur son domaine de recherche sur les agrégats métalliques.

Des remarques analogues pourraient être faites dans les autres disciplines. En biologie structurale, M. Max PERUTZ déclare très nettement, dans sa lettre au Monde, que c'est au LURE que les biologistes britanniques ont appris à utiliser le rayonnement synchrotron pour les études structurales (la phase de diffraction, habituellement difficile à déterminer, est obtenue sur un seul cristal et par deux mesures à des longueurs d'onde appropriées, par une application originale de la diffusion anormale). On peut aussi noter l'expertise récente demandée par le Royaume Uni à M. Roger FOURME, biologiste structural au LURE, sur le management scientifique du synchrotron SRS à Daresbury. En fait, si l'effort britannique est actuellement plus important en volume, c'est que les chercheurs anglais ont développé depuis longtemps cette recherche avec des sources X classiques. Les Français, moins nombreux jusqu'ici, ont, grâce au rayonnement synchrotron, une recherche de valeur tout à fait comparable. Il semble en fait que l'école française du rayonnement synchrotron est compétitive au niveau mondial, tant pour les applications du rayonnement synchrotron que pour leur technologie (microscope X, lasers à électrons libres, etc.).

M. Jacques FRIEDEL a alors abordé le troisième point de son exposé, concernant le rôle d'un laboratoire national de rayonnement synchrotron.

On peut dès l'abord constater qu'il existe certes un centre européen de rayonnement synchrotron, l'ESRF, dont le rôle n'est pas en cause. Mais un nombre important de synchrotrons de 3^{ème} génération sont en construction en Europe et ils sont tous nationaux. Dans les pays limitrophes, c'est le cas de la Grande-Bretagne, de l'Allemagne, de l'Italie et de la Suisse, dont l'exemple résume parfaitement la situation. Dans son effort pour accéder à la maîtrise du rayonnement synchrotron, la Suisse a fait ses premières armes à l'ESRF puis a estimé indispensable de se doter de son propre centre national, une source de 3^{ème} génération.

Pour quelles raisons, ces pays ont-ils choisi de se doter de sources nationales ? L'analyse de la situation actuelle du LURE l'explique, même si ses installations sont vieillissantes et son fonctionnement limité par manque de crédits. Contrairement aux autres très grands équipements comme le CERN, le rayonnement synchrotron touche un nombre très important de chercheurs. Parmi les 1800 utilisateurs du LURE en 1999, cent y travaillent à plein temps. Les autres se répartissent pour l'essentiel en petites équipes de 3 à 4 personnes, dotées chacune de leur laboratoire et de leur équipement. LURE leur offre la possibilité de mener des études complémentaires. Une fois leur projet débroussaillé, certaines équipes peaufinent leurs expériences à l'ESRF. C'est le cas de 90 % des Français qui y ont travaillé en 1999.

Les chefs de projets acceptés au LURE proviennent à 40 % de l'Ile-de-France, à 40 % des autres régions françaises et à 20 % des pays étrangers. Cette répartition correspond aux trois grandes fonctions d'un centre national.

La première fonction est naturellement de participer à l'effort général d'invention et de développement des techniques d'exploitation du rayonnement synchrotron. Loin d'avoir fini de progresser, ces techniques connaissent un développement rapide. Cette tâche est facilitée pour LURE par son environnement scientifique en région parisienne (universités Paris VI, VII et XIII) et notamment par un environnement immédiat : université Paris Sud, Ecole Polytechnique, CEA, CNRS, Gif, grands laboratoires industriels à proximité. LURE et cet environnement de haut niveau sont en interaction positive, les centres de recherche bénéficiant des compétences du LURE et injectant des idées nouvelles de manipulations.

La deuxième fonction est de participer à la formation, notamment au niveau des thèses. LURE participe pleinement à une activité qui fait de l'Université Paris Sud, la première de France en nombre de thèses soutenues par enseignant. D'une façon générale, LURE est un grand centre de formation interdisciplinaire. Les chercheurs pratiquant ces installations ont des vues sur l'évolution des thèmes de recherche les plus modernes, ce qui retentit sur leurs enseignements comme sur leurs recherches. Les retombées provinciales du LURE sont ainsi importantes. La création de ce laboratoire a vu, dès les années 1970, le lancement en physique et chimie de petites équipes dynamiques dans de nombreuses universités de province, particulièrement appréciées par les commissions du Comité consultatif des universités d'alors. Cette dynamique a continué et ne ferait que se renforcer avec le démarrage de SOLEIL.

La troisième fonction du LURE a été, dès le départ, le développement de collaborations internationales. Les relations avec Frascati, et les Italiens datent de la genèse du LURE. Les exemples des Britanniques pour les structures biologiques et des Etats-Unis pour l'EXAFS ont été notés. Comme tous les autres projets menés en commun, ces collaborations ont été menées sur un pied d'égalité, dans des domaines d'intérêt commun. Ce type essentiel de stimulation disparaîtra en l'absence d'un successeur comme SOLEIL.

Pour conclure, M. Jacques FRIEDEL voit peu de solutions à la situation actuelle. La première solution serait de construire SOLEIL tout de suite. C'est pour lui la meilleure solution. Le site d'Orsay-Saclay-Evry lui paraît le meilleur pour des raisons scientifiques, techniques et financières. Mais la question de la localisation est secondaire.

La deuxième solution est celle de DIAMOND. M. Jacques FRIEDEL a observé qu'il ne servirait à rien de construire en complément un anneau spécialisé dans les UV. Au vrai, cette solution conduit non seulement à une perte d'activité de moitié, au moins, mais aussi à la démobilisation et à la dispersion regrettables d'un grand nombre de chercheurs de qualité.

La troisième solution, peut-être la plus raisonnable au vu de l'opposition du ministre, serait de ne rien faire dans l'immédiat et d'attendre que la polémique actuelle s'apaise avant de reprendre le dossier dans deux ou trois ans.

En tout état de cause, "*les très grands équipements ne se gèrent pas par des coups de baguette magique*". Les investissements dans ce domaine se préparent longuement et les décisions de programmation

doivent être lissées. " *Chaque projet doit s'intégrer dans une planification à 10 ou 20 ans* ".

En toute hypothèse, si la décision de construire SOLEIL devait être repoussée de plus de 3 ans, la France se désengagerait de fait du rayonnement synchrotron pour 20 ans, en raison de la dispersion inéluctable des équipes de spécialistes de ces technologies.

Alors, si la biologie verrait peut-être ses crédits augmenter à la marge, elle serait en fait condamnée à progresser par ses seuls moyens, une situation hautement défavorable car cette discipline doit se développer en liaison avec d'autres pour maximiser ses efforts. A cet égard, si le rayonnement synchrotron a initialement été mis au point pour d'autres disciplines que la biologie, celle-ci en bénéficie aujourd'hui au premier chef.

Au reste, les besoins de la biologie ne sauraient se résumer à l'étude des structures de protéines. Au contraire, les études d'ordre local dans les macromolécules du vivant et la dynamique des structures sont des moyens d'étude d'une importance capitale pour l'avenir, moyens que la biologie ne peut en aucun cas développer seule.

Au contraire, c'est précisément avec un synchrotron à vocation générale et avec l'aide de la communauté des spécialistes du rayonnement synchrotron que ces méthodes peuvent être mises en œuvre.

La solution DIAMOND est bien " *la pire des solutions* ".

*

Dans la discussion qui a suivi l'exposé de M. Jacques FRIEDEL, **M. Georges CHARPAK** a rappelé que les partisans de la solution DIAMOND mettent en avant l'économie que cette solution devrait générer avec une dépense d'environ 500 millions de francs contre 2,8 milliards de francs pour SOLEIL.

Si telle est l'intention, ce schéma permettrait en effet d'allouer des crédits plus importants à la biologie et d'aider à la création de nouvelles entreprises de haute technologie dans le périmètre Orsay-Saclay. Au final, une telle option ne serait pas incompatible avec la décision de construire SOLEIL, par exemple à Lille, dans trois ans, avec une ouverture aux chercheurs britanniques facilitée par ce choix d'une implantation dans le Nord de la France.

M. Jacques FRIEDEL s'est alors interrogé sur la possibilité réelle d'une coopération européenne à l'échéance de trois ou cinq ans. En réalité, cette perspective est compromise par le fait qu'à cet horizon, tous les pays européens auront leur source nationale de 3^{ème} génération.

Le découpage national est une réalité qui ne peut être niée dans le domaine du rayonnement synchrotron. Même si, dans le contexte international, il faut intégrer les activités des différents synchrotrons pour une efficacité maximale, il n'est pas nécessaire en l'occurrence de mettre en place une superstructure européenne toujours lourde et facteur de blocages.

En définitive, il y a tout lieu de penser que dans les dix ans qui viennent, l'Europe ne sera pas un élément moteur dans le domaine du rayonnement synchrotron.

M. Georges CHARPAK a alors souligné qu'une demande réelle de coopération existe en Europe, notamment de la part de l'Espagne et bientôt des Pays de l'Est et qu'au demeurant et qu'il n'y pas de blocage à redouter dès lors que des choix d'investissement sont clairement faits.

M. Jacques FRIEDEL est alors revenu sur la réalité des avantages attendus de la solution DIAMOND. Alors que le coût réel de la participation française à DIAMOND apparaît selon toute probabilité comme supérieur aux 350 millions de francs actuellement affichés, la contribution potentielle des régions candidates à l'accueil de SOLEIL est étrangement minimisée, notamment par l'assertion contraire à la vérité que le financement régional appartient à la même catégorie budgétaire que les crédits du ministère de la recherche.

Au demeurant, si la région Ile-de-France n'a pas dans le passé soutenu la recherche de la région parisienne, son intérêt pour SOLEIL est incontestable du fait de l'impact économique et scientifique et de la visibilité politique d'un tel investissement. Or, répondant aux souhaits du ministère, un plan à soumettre à la région en remplacement de sa participation à SOLEIL est bien en cours de discussion dans la zone Orsay-Saclay. Fait notable, ce plan très classique prévoit une "*portion mineure*" de la subvention totale à la biologie et au contraire un saupoudrage au bénéfice de la recherche appliquée.

M. Pierre POINTU a alors confirmé la préparation d'une telle solution de remplacement, à compter de l'annonce faite le 2 août 1999 par le ministre de la recherche d'abandonner le projet SOLEIL.

M. Jochen SCHNEIDER, revenant sur l'urgence d'une décision positive pour SOLEIL, a fait remarquer que les équipes du LURE commencent à être gravement démotivées et que si l'attente se prolongeait, elles pourraient bien se disperser aux quatre coins de l'Europe et en particulier au Royaume Uni, rendant vaine par avance toute idée de construction d'un nouveau synchrotron dans 3 ou 4 ans.

A ce point de la discussion, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a porté à la connaissance des participants, la piste de réflexion suggérée par M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF, lors de la visite effectuée le 28 janvier à Grenoble. Il s'agit de comparer les coûts respectifs de deux synchrotrons similaires à SOLEIL, construits simultanément l'un en France et l'autre au Royaume Uni avec ceux d'un achat de 7 lignes sur DIAMOND et de la construction d'une machine de 1,5 GeV.

La seule duplication des machines devrait générer une économie de 25 à 30 %, tout en répondant à l'objectif d'une coopération franco-britannique accrue.

Ce que l'on pourrait appeler "*l'équation de PETROFF*" est en cours de résolution par son auteur et ses résultats une fois validés seront portés prochainement à la connaissance du groupe de travail.

M. Georges CHARPAK, présent aux côtés de M. TRÉGOUËT lors de la visite de l'ESRF, a salué l'idée d'une construction de deux machines "*clonées*" mais dotées toutefois de lignes de lumière différenciées, comme "*la première proposition logique et innovante*" entendue par le groupe de travail. Ainsi seraient obtenues des économies de frais d'étude et au surplus une diminution du coût global si le Royaume Uni acquérait des lignes.

M. Pierre POINTU a indiqué que la visite du LURE avait permis aux membres du groupe de travail de découvrir qu'il existe un optimum d'énergie – en l'occurrence de 2,5 à 3 GeV – pour obtenir la meilleure qualité de faisceaux. Cette contrainte s'applique à tout synchrotron, que ce soit celui du LURE ou le futur DIAMOND. Il y aurait certainement de grands avantages à standardiser les accélérateurs linéaires et les anneaux de stockage, la diversité portant sur les seules lignes de lumière.

M. Jochen SCHNEIDER, directeur du Hasylab d'Hambourg, a quant à lui constaté que la construction de toute nouvelle machine donne lieu à des innovations. L'idée de reproduire à l'identique deux synchrotrons correspondrait à l'opinion selon laquelle des progrès ne seraient pas

possibles dans le temps, ce qui équivaldrait à être proche de la limite théorique de qualité des faisceaux. En raison des économies qu'il génèrerait presque certainement, un tel programme mérite toutefois d'être examiné en détail.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a alors indiqué que cette solution est examinée en tant que piste de recherche et non pas en tant que préconisation définitive. La pertinence scientifique d'une telle démarche reste à démontrer. En tout état de cause, ce qui apparaît aujourd'hui établi par les spécialistes, c'est qu'il existe un optimum d'énergie pour les synchrotrons de 3^{ème} génération, en raison du fait que l'augmentation d'énergie après coup d'une machine sous-dimensionnée est à la fois coûteuse et décevante en termes de performances.

Reprenant la parole sur la solution consistant en la construction concertée de deux synchrotrons similaires, **M. Jacques FRIEDEL** a fait connaître qu'il n'est pas du tout opposé à une telle démarche si elle reste flexible mais que le Royaume Uni pourrait répugner à diminuer l'énergie de son propre équipement, DIAMOND étant dessiné pour une énergie plus élevée.

M. Jean GALLOT a rappelé à cette occasion que les négociations avec le Royaume Uni sur la duplication du projet SOLEIL ne pourraient en tout état de cause être dilatoires, puisque, comme M. PETROFF l'a indiqué, elles ne devraient pas durer plus de deux mois. Il lui paraît capital à cet égard d'accélérer la prise de décision afin de tirer parti de la bonne conjoncture budgétaire. **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a noté à cet égard qu'il s'agit bien en l'espèce d'inverser une tendance, puisque les budgets de la recherche pour 1999 et pour 2000 ont marqué que les très grands équipements deviennent une préoccupation secondaire pour le Gouvernement.

M. Jacques FRIEDEL a alors indiqué qu'il n'est pas évident que l'effort global sur les très grands équipements diminue et qu'il convient en tout état de cause de sérier les problèmes. *" Il existe d'autres très grands équipements dont l'urgence est inférieure à un nouveau synchrotron "*. La station spatiale habitée, par exemple, *" ne sert à rien , sauf pour les biologistes "*. Tout indique par ailleurs qu'en raison des difficultés du partenaire russe *" elle ne démarrera pas "*.

En toute hypothèse, il est nécessaire et possible de faire des économies sur certains très grands équipements *" mais pas dans le domaine du rayonnement synchrotron "*.

*

M. Paul-Henri REBUT, ancien directeur général du JET (Joint European Torus), et conseiller de M. René PELLAT, Haut commissaire à l'énergie atomique, chargé des négociations avec le Royaume Uni sur DIAMOND, a été invité à retracer son expérience de responsable d'un très grand équipement européen et a commencé par énoncer les conditions à satisfaire pour qu'un projet international se déroule d'une manière satisfaisante.

M. Paul-Henri REBUT a tout d'abord indiqué que, s'agissant du JET installé à Oxford, la région environnante et au total le Royaume Uni ont bénéficié de 70 % des dépenses d'investissement et d'exploitation. Certes, pour certains équipements de pointe, les commandes peuvent déborder la région voire même le pays d'accueil. Mais si l'on fait, comme cela se doit, le bilan total en intégrant sur une longue période les dépenses d'investissement et les dépenses d'exploitation, une région a un avantage évident à accueillir de très grands équipements.

Une condition essentielle à remplir pour un très grand équipement est bien évidemment sa localisation à proximité immédiate d'un aéroport international. A cet égard, M. Paul-Henri REBUT a noté qu'une distance comme celle séparant l'aéroport d'Heathrow d'Oxford, soit une heure de transport, est une limite à ne pas dépasser.

L'importance d'autres infrastructures comme des écoles internationales autour du très grand équipement doit être également soulignée. Par ailleurs, il ne faut pas sous-estimer la taille des équipes mixtes permanentes accueillant les chercheurs visiteurs et les aidant à mettre en œuvre les équipements de l'installation, une tâche difficile pour des utilisateurs occasionnels qui doivent toujours minimiser leur temps de séjour sur le site.

M. Paul-Henri REBUT a ensuite souligné que le premier report de la décision de construire un prolongement au JET s'est traduit par un enchaînement de rejets successifs, estimant que *" si on repousse une décision une fois, il est difficile de remonter la pente "*. Au vrai, *" un projet peut attendre deux à trois ans, au-delà on peut mettre une croix dessus, on concevra un autre projet "*.

S'agissant du nombre de synchrotrons à construire pour l'avenir, M. Paul-Henri REBUT a estimé que seul le plan de charge doit apporter la réponse. En réalité, si ce plan de charge ne justifiait pas deux machines et si les conditions de site énoncées précédemment étaient réunies, alors il serait viable de collaborer avec les Britanniques.

Invité par **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, à brosseur un tableau de son expérience au JET, **M. Paul-Henri REBUT** a remarqué que la construction du JET s'est effectuée sous le Gouvernement de Mme THATCHER. En tant qu'investissement au service d'une recherche à très long terme, le JET n'a pas été freiné par le Gouvernement mais n'a pas non plus bénéficié de son soutien, alors que la rentabilité à 5 ans était érigée en critère de décision fondamental de l'action publique.

Le JET, construit dans le cadre d'Euratom, a été décidé à l'unanimité des pays membres de l'Union européenne. Pour autant, le Royaume Uni n'a pas "*joué son rôle d'hôte*", même si les spécialistes du JET ont été bien reçus dans les Collèges d'Oxford et ont bénéficié d'infrastructures locales satisfaisantes. Le contraire eût étonné dans la mesure à l'investissement global correspondant au JET représente un total d'un milliard d'euros, dont la moitié pour l'investissement initial, avec plus de 200 physiciens permanents sur l'installation et plus d'un millier d'employés de sous-traitants présents en moyenne sur le site.

Appuyant une remarque de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, sur ce sujet, **M. Paul-Henri REBUT** a jugé indispensable d'établir des prévisions, non seulement pour les investissements mais pour l'exploitation des 7 lignes de lumière sur DIAMOND. A cet égard, il faut tenir compte impérativement de l'instrumentation et des dépenses en personnel de support. Au demeurant, la France doit avoir en tête qu'avec les Britanniques, "*ce qui écrit n'a pas beaucoup plus de valeur que ce qui est dit*" et que tout est "*renégociable*".

Un débat s'est alors amorcé sur la capacité de la France à peser réellement sur les décisions dans le cas de la solution DIAMOND.

M. Paul-Henri REBUT a jugé que la faiblesse de son investissement dans DIAMOND ne placerait pas notre pays dans une position satisfaisante.

M. Georges CHARPAK a confirmé que la présence sur son sol du site du CERN a permis à la France de bénéficier de retombées plus importantes que tout autre pays. Il a suggéré enfin que, dans le cadre du clonage, on cherche à vendre au Wellcome Trust 3 lignes sur la machine française et que la France fasse participer d'autres pays au montage.

M. Paul-Henri REBUT a indiqué son accord pour donner une "*couleur européenne*" à un nouveau synchrotron mais a estimé qu'une telle démarche, en requérant une inscription dans le PCRD, serait ardue.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a alors estimé que la notion de "clonage" de SOLEIL pour la nouvelle machine britannique doit être compatible avec l'autonomie de choix et de décision de chacun des deux pays, grâce à une nécessaire marge de flexibilité dans les caractéristiques de la machine.

Ainsi, le projet SOLEIL comprend un Laser à Electrons Libres (LEL) qui ne doit pas être remis en cause. Par ailleurs, il convient de prévoir une souplesse et une adaptabilité suffisantes de la machine pour permettre aux Britanniques de pousser l'énergie de leur synchrotron à 3 GeV ou plus si nécessaire.

La souplesse et l'adaptabilité du futur synchrotron seraient alors une contribution très importante pour l'avenir de ces équipements en Europe, en facilitant considérablement de nouveaux investissements dans ce domaine.

*

A l'invitation de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, M. Jochen SCHNEIDER**, directeur du HASYLAB de Hambourg, est alors revenu sur le développement du rayonnement synchrotron en Allemagne.

Le premier fait marquant est la montée en énergie du synchrotron BESSY II de Berlin, réalisée actuellement grâce à l'implantation d'aimants supraconducteurs afin d'améliorer les performances de la machine pour les études structurales. A terme de cette modernisation, BESSY II pourra produire des rayons X d'une longueur d'onde de 0,5 Å.

Par ailleurs, le synchrotron ANKA d'une énergie de 3 GeV est en cours d'achèvement. Sa construction résulte de la volonté du land de Bade-Wurtemberg de développer un pôle de micro-mécanique, l'industrie tardant toutefois à s'associer à ce projet.

Par ailleurs, l'anneau de stockage DORIS de Hambourg connaît un fonctionnement satisfaisant et peu onéreux, dans la mesure où il appartient à un ensemble de 6 anneaux dédiés pour la plupart à la physique des hautes énergies. Des améliorations de DORIS sont actuellement à l'étude, dans la mesure où le projet HERA de physique des particules doit s'achever en 2005-2006, libérant de la place et des crédits pour d'autres projets. A cet égard, le HASYLAB envisage d'utiliser l'anneau PETRA d'une circonférence de 2,3 km pour produire du rayonnement synchrotron encore supérieur au rayonnement de l'ESRF.

Un des buts prioritaires à long terme du HASYLAB de Hambourg est bien la mise au point d'un Laser à Electrons Libres (LEL) émettant dans les rayons X. Actuellement un LEL V-UV est en construction et devrait démarrer en 2003.

Ainsi, au plan général, il apparaît que les efforts de l'Allemagne s'exercent dans trois directions. La première est la montée en énergie de BESSY II à Berlin afin de satisfaire les besoins en rayonnements X de la biologie structurale et d'attirer davantage d'utilisateurs. La deuxième direction est celle du maintien en fonctionnement de DORIS à Hambourg car cette machine, certes d'une brillance peu élevée, recèle un potentiel important d'applications nouvelles. La troisième direction est celle des progrès dans la voie des Lasers à Electrons Libres.

Une question fondamentale pour l'Allemagne est actuellement de déterminer s'il faudra à l'avenir construire une machine supplémentaire, alors qu'on disposera d'un LEL et qu'on continuera de pouvoir accéder à l'ESRF.

En tout état de cause si le projet HERA devait continuer au-delà de son terme envisagé de 2005-2006, la décision de construire un nouveau synchrotron serait effectivement prise.

A propos de la France, M. Jochen SCHNEIDER a remarqué qu'il lui manque un synchrotron moderne constituant une base indispensable pour la recherche, au contraire de l'Allemagne qui, avec ses nombreuses machines, dispose des infrastructures nécessaires.

M. Jochen SCHNEIDER a enfin indiqué que, pour sa part, il ne voyait pas de possibilité de construire un troisième synchrotron de type SOLEIL en Allemagne pour générer des économies unitaires additionnelles, un nouveau synchrotron de ce type n'ayant pas sa place dans le parc allemand.

Dans le débat qui a suivi cet exposé, **M. Vincent MIKOL** a indiqué que si la décision était prise d'opter pour DIAMOND, les entreprises " *start-up* " dont la création représente une priorité pour le ministère de la recherche, s'établiraient sans conteste à Oxford. Par ailleurs, l'idée d'une construction concertée et simultanée de deux machines similaires lui est apparue intéressante, en raison des économies d'échelle à attendre d'une telle démarche, même si elle va à contre-courant de la stratégie de l'industrie qui est plutôt de concentrer les moyens que de les essaimer.

Par ailleurs, M. Vincent MIKOL a réaffirmé que 90 % des structures de protéines élucidées par l'industrie le sont par cristallographie avec des rayons X produits par des synchrotrons et non pas par la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN). Les grands laboratoires pharmaceutiques disposent tous d'équipements propriétaires de RMN mais ne déterminent plus les structures avec cette méthode. La RMN a certes un potentiel à long terme mais avec ses limites actuelles, elle n'est pas substituable dans les 5 ans à la cristallographie.

Pour conclure le débat, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a insisté sur le fait que les industriels ne sont plus désireux de participer à des investissements de recherche sur plusieurs années. La notion de retour rapide sur investissement l'emporte sur toute autre considération. Pour autant, l'accès à des instruments modernes est essentiel, ce qui a pour conséquence que le positionnement des laboratoires se fera toujours davantage autour des très grands équipements à vocation applicative.

*

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, et **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, ont alors donné la parole à M. Edouard BREZIN, Président et Mme Catherine BRÉCHIGNAC, directeur général du CNRS.

Pour commencer son propos, **Mme Catherine BRÉCHIGNAC** a rappelé que le rayonnement synchrotron a permis de gagner 12 ordres de grandeur en brillance par rapport aux tubes à rayons X, et a trouvé des applications immédiates pour l'observation de la matière vivante et de la matière inerte, suscitant la création de communautés d'utilisateurs, d'abord en physique, puis en chimie et enfin en biologie.

La communauté scientifique française utilise 25 à 30 % du temps de faisceau de l'ESRF, 80 % de celui du LURE et quelques pour-cent des synchrotrons étrangers.

S'agissant de la répartition du temps de faisceau entre disciplines, les comparaisons nécessitent des précautions méthodologiques précises. En particulier, la notion de " *run* ", distincte d'une installation à l'autre, représente 24 heures de faisceau au LURE, et 8 heures à l'ESRF où elle prend d'ailleurs le nom de " *shift* ". Il faut par ailleurs distinguer les statistiques en nombre de projets et en nombre d'utilisateurs accédant à un synchrotron et celles en termes de temps machine. Ainsi, si, selon M. Yves PETROFF, la biologie représente 30 % du total, il s'agit du nombre d'utilisateurs. En tout état de cause, les sciences du vivant

représentent en fait environ 20 % du temps de faisceau total mis en œuvre par les chercheurs français, avec un pourcentage similaire de 20 % pour la chimie et le restant, soit 60 %, pour la physique.

En tout état de cause, il existe d'ores et déjà un décalage entre l'offre de temps de faisceau et la demande d'accès, qui traduit une pression croissante de la demande.

A la demande du CNRS, M. Yves FARGE a étudié l'évolution prévisible du nombre d'utilisateurs de rayonnement synchrotron. Ce nombre devrait être multiplié par 2,5 pour la biologie et la chimie et par 1,5 pour la physique.

Parmi les moteurs de cette évolution, il faut citer la croissance des besoins de la biologie pour la résolution des structures des protéines, mais également, dans le domaine pharmaceutique, l'essor des techniques d'étude des poudres pour le conditionnement des médicaments. La physique a des besoins moindres pour l'étude des structures mais une demande en forte augmentation pour l'étude de la dynamique des systèmes, dans laquelle le rayonnement synchrotron couplé à l'utilisation des lasers apporte une solution de grande qualité. Au demeurant, pour le rayonnement synchrotron comme pour d'autres techniques, la physique transfère des technologies aux autres disciplines.

Si l'on compare la situation de l'Europe avec celle des Etats-Unis, on constate un nombre de projets américains plus important dans le domaine de la biologie qu'en Europe. Ceci est à mettre en parallèle avec un nombre de postes expérimentaux plus élevés aux Etats-Unis (138) qu'en Europe (128), pour des populations de chercheurs comparables.

Au reste, quels sont les besoins de la France en temps de faisceau ? Il apparaît clairement, si nous ne voulons pas diminuer le potentiel de chercheurs utilisant le rayonnement synchrotron en Europe, que le nombre de postes expérimentaux doit être maintenu. C'est ainsi que la politique générale des différents pays est de fermer les anciens synchrotrons et d'en construire de nouveaux. C'est notamment le cas aux Etats-Unis et en Allemagne. La France est confrontée au même problème avec, dans quelques années, l'obsolescence du LURE, et le Royaume Uni avec celle de la source SRS de Daresbury.

Comment y parvenir ? Mme BRÉCHIGNAC, directeur général du CNRS a alors établi un historique des solutions envisagées depuis que la question est examinée.

A cet effet, un accord cadre a été signé par le CNRS et le CEA, le 14 novembre 1997, avec le CCLRC (Royaume Uni) et le CEPF (Suisse) pour une coopération en matière de nouvelles sources de rayonnement synchrotron.

Suite au constat que la Suisse s'orientait vers une source de 3^{ème} génération de 2,4 GeV plus petite que celle recherchée par la France, deux schémas ont alors été étudiés.

Le premier est celui de deux synchrotrons complémentaires avec une forte interaction entre les deux. La deuxième piste de réflexion est celle de deux machines jumelles construites l'une en France et l'autre au Royaume Uni, avec une complémentarité des deux synchrotrons vis-à-vis de l'ESRF.

Compte tenu des progrès technologiques des synchrotrons, il n'est point besoin d'une machine à forte énergie (6 GeV) comme celle de l'ESRF, pour produire des rayons X "durs", une énergie de 2 à GeV étant suffisante à cet égard.

Bien que plus économique pour tous, le schéma de deux machines jumelles est toutefois abandonné au profit d'une complémentarité poussée entre les deux synchrotrons français et anglais, pour des raisons essentiellement politiques, à savoir la volonté de renforcer la coopération franco-britannique dans le domaine de la recherche.

Dès lors, une instruction ministérielle de Mme Elisabeth DUFOURCQ, confirmée par M. François d'AUBERT, demande au CEA et au CNRS l'établissement d'un avant-projet détaillé d'un synchrotron de 3^{ème} génération et d'une énergie inférieure à celle de l'ESRF, demande qui débouchera sur l'avant-projet SOLEIL.

A ce stade de l'exposé de Mme BRÉCHIGNAC, après avoir souligné les conséquences opposées en terme de coûts du "clonage" qui peut permettre une baisse des coûts et de la "complémentarité" qui aboutit au contraire à une augmentation de ceux-ci, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a demandé des précisions sur le contenu de l'instruction ministérielle en la matière.

Selon **M. Edouard BREZIN**, Président du conseil d'administration du CNRS, les instructions à ce sujet ne furent pas "lumineuses". Au reste, il s'agit d'un problème scientifique auquel il n'est pas aisé d'apporter une réponse.

La construction de deux machines identiques serait effectivement de nature à permettre une économie de 20 à 30 %. Toutefois, selon différents points de vue exprimés récemment, notamment dans un article de la revue Science d'août 1999, un équilibre harmonieux en Europe entre les différentes machines existantes voudrait qu'à côté d'un synchrotron de haute énergie comme l'ESRF, ou le synchrotron d'Argonne aux Etats-Unis, il existe des machines avec des brillances et des longueurs d'onde moins élevées, machines essentiellement dédiées à l'étude des dynamiques structurales.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur a remarqué que trois personnalités, M. Yves FARGE, M. Roger FOURME et M. Yves PETROFF ont fait état de l'existence d'un optimum en énergie, à environ 2,5 GeV, pour un synchrotron utile à toute la communauté scientifique et laissant des possibilités de développement pour le futur. Quant au "*clonage*", il devrait apporter non seulement des économies d'investissement mais également de maintenance.

Mme Catherine BRÉCHIGNAC a alors indiqué que lorsque l'option de la complémentarité a été choisie, l'énergie de la machine britannique a été fixée à 3 GeV au moins, au contraire du futur synchrotron français positionné à 2 GeV. L'on sait aujourd'hui que l'énergie de SOLEIL a progressivement été rehaussée, à 2,5 GeV puis à 2,7 GeV, à la demande des sciences de la vie pour leurs études structurales.

Mais précisément, le CNRS est extrêmement attaché "*à ne pas avoir de machine trop dédiée*" à la satisfaction d'un seul type de besoins. En effet, les chercheurs de toutes les disciplines travaillant autour d'un même instrument, ici le synchrotron, celui-ci devient un "*lieu de rencontres*" d'une rare qualité.

Au demeurant, les interactions de la physique avec les autres sciences et notamment avec la biologie, sont à entretenir, puisque aussi bien c'est le travail de la physique de fabriquer des instruments pour les autres sciences.

Le débat qui a suivi a porté la pluridisciplinarité qui caractérise un synchrotron, et le renforcement des contacts entre chercheurs qu'il permet, avec "*l'effet cafétaria*" noté par **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, avec l'aide apportée par les résidents aux chercheurs visiteurs. Ainsi, le synchrotron et les laboratoires d'adaptation aux besoins des instruments, en particulier dans les disciplines émergentes, comme au LURE, sont indissociables, ainsi que l'a estimé **M. Edouard BREZIN**.

Pour **Mme Catherine BRÉCHIGNAC**, le rayonnement synchrotron revêt un caractère stratégique dans de nombreuses disciplines. A cet égard, on peut citer la biologie avec la structure des protéines et les études de dynamique, les composants pour les sciences de la communication avec en particulier les nano-objets, le domaine de l'énergie avec la séparation poussée et l'étude de la migration des radioéléments dans le milieu environnant, les géosciences, l'étude de l'environnement avec la conjonction du rayonnement synchrotron et des radars dans le domaine lumineux (lidars) et enfin le programme de défense nationale.

Dans l'ensemble des applications du rayonnement synchrotron, on peut également citer trois axes majeurs d'impact de cette technologie, d'une part la mise au point de médicaments, l'analyse des traces pour la protection de l'environnement et l'imagerie des objets opaques.

Mais qu'en est-il du poids des très grands équipements (TGE) sur le budget de la recherche ?

Mme Catherine BRÉCHIGNAC a précisé que trois organismes sont principalement intéressés à leur construction et à leur mise en œuvre, le CNES, le CEA et le CNRS.

S'agissant du CNRS, ses dépenses sont consacrées à hauteur de 70 % aux rémunérations et à 30 % aux investissements et au fonctionnement des laboratoires. Au demeurant, cette structure s'inscrit dans un mouvement général de croissance en valeur absolue des dépenses de recherche en France, mais de leur stagnation sinon de leur diminution en valeur relative. Par ailleurs, l'effort de recherche en Europe avec 1,8 % du PIB, est incontestablement inférieur à celui des Etats-Unis (2,3 %) et du Japon (2,7 %).

Avec un montant total annuel de 350 millions de francs, le budget des très grands équipements représente environ 12 % de ce qui est donné chaque année aux laboratoires pour leurs investissements et leur fonctionnement. Il est à noter que cette somme est consolidée pour l'ESRF, les salaires étant compris, mais non pas pour le LURE. Au reste, le poids des très grands équipements est sensiblement le même au CNRS et au CEA.

A cette occasion, **M. Jean-Pierre CHANGEUX** s'est interrogé sur les raisons pour lesquelles les laboratoires du CNRS du domaine des sciences de la vie bénéficient de crédits inférieurs à leurs homologues de l'INSERM et s'il ne fallait pas y voir une conséquence de la "ponction" opérée sur le budget du CNRS par les très grands équipements.

Mme Catherine BRÉCHIGNAC a alors indiqué que les crédits des sciences de la vie ont effectivement baissé relativement pendant le mandat de M. François KOURILSKI, qui est un scientifique des sciences de la vie, dans le but d'inciter celles-ci à coopérer avec les autres disciplines et à développer les interfaces. Il est cependant incontestable que les laboratoires de l'INSERM ont effectivement plus de ressources par chercheur que ceux du CNRS. Cette inégalité demeure dans un rapport d'environ de 1 à 2, que l'on incorpore ou non le budget des TGE aux crédits des laboratoires. En réalité, on observe le même décalage avec le CEA et le CNRS en ce qui concerne les physiciens et entre l'INRIA et le CNRS pour les informaticiens. En toute hypothèse, "*cela n'est pas une question de TGE : les TGE ne font pas plonger la machine*". La vraie question est donc l'augmentation du budget du CNRS.

Depuis une dizaine d'années, le budget annuel des TGE au CNRS évolue autour de 350 millions de francs. De surcroît, sur une vingtaine d'années, l'évolution des montants consacrés tant à leur construction qu'à leur exploitation est plus lente que celle du BCRD.

Une évolution se dessine toutefois s'agissant des TGE : c'est celle de la prédominance du spatial, en raison d'orientations politiques marquées. Les investissements pour la physique comprennent la participation française à la construction du LHC (Large Hadron Collider) du CERN et la part française au projet franco-italien VIRGO, destiné à mettre en évidence pour la première fois des ondes gravitationnelles.

Le budget du rayonnement synchrotron au CNRS consiste en une contribution de 64 millions de francs à l'ESRF et de 23 millions de francs pour le LURE (salaires non compris). Ce montant doit être rapproché du budget global du CNRS, soit environ 15 milliards de francs et surtout du montant de ses investissements annuels soit 3 milliards de francs en moyenne. Au reste, la construction de SOLEIL était programmée dans une période où devait s'achever le projet VIRGO, maintenant constante la part dédiée aux TGE dans le budget du CNRS.

Concernant les très grands équipements, certains observateurs préconisent d'allouer leurs crédits aux laboratoires, à charge pour ceux qui sont intéressés par les TGE de leur reverser les sommes correspondantes. La conception française des TGE est très éloignée de cette approche, en ce qu'elle considère les TGE comme un "*service public de la recherche*", dont l'usage, comme tel, n'est pas facturé aux utilisateurs. Une telle orientation, largement partagée en Europe, présente aussi l'intérêt d'inciter les laboratoires étrangers à coopérer avec les laboratoires français pour accéder à ces instruments.

En réponse à **M. Jean-Pierre CHANGEUX** qui s'est demandé s'il ne serait pas possible de disposer au sein des laboratoires d'équipements plus petits dotés des mêmes performances, **Mme Catherine BRÉCHIGNAC** a indiqué que les grosses machines sont indispensables, tandis que **M. Vincent MIKOL** spécifiait que les biologistes vont toujours vers la meilleure source de rayonnement disponible.

M. Jean-Pierre CHANGEUX ayant remarqué qu'il pourrait être avantageux d'orienter en amont les projets de recherche vers les synchrotrons ou vers les lasers, **Mme Catherine BRÉCHIGNAC** a précisé que les études structurales en biologie ne peuvent s'effectuer avec ces instruments. Toutefois, les lasers, à qui le CNRS alloue la moitié de la somme dont dispose le LURE, font apparaître, pour ce qui concerne les lasers " *femtoseconde* " des perspectives intéressantes pour l'étude des dynamiques temporelles courtes. Il reste que les comités de programme du LURE ou de l'ESRF réorientent systématiquement vers d'autres méthodes expérimentales les projets qui n'ont pas un besoin strict du rayonnement synchrotron. Mais comme l'a indiqué **M. Edouard BREZIN**, il existe aussi un transfert vers les synchrotrons des expérimentations autrefois conduites avec des neutrons.

A cet égard, **M. Jochen SCHNEIDER** a estimé que la résolution temporelle constitue une des applications les plus prometteuses du rayonnement synchrotron et que les machines de l'énergie du LURE conviennent mieux que les machines de forte énergie.

Faisant observer qu'à son avis l'Office parlementaire devait avoir pour principal objectif de " *mettre les choses dans le bon sens* " sur le projet de nouveau synchrotron, **Mme Catherine BRÉCHIGNAC** a précisé les masses budgétaires en jeu.

Sur un investissement total qui se monterait à 1,6 milliard de francs, l'avant-projet détaillé SOLEIL distingue 500 millions de francs de frais de personnel, soit un coût d'équipement de 1,1 milliard de francs. Avec une contribution de 600 à 700 millions de francs de la région d'accueil, le poids de SOLEIL sur les budgets du CNRS et du CEA ressortit à 300 millions de francs pour chacun, soit 30 millions de francs par an sur 10 ans. Ces montants sont à mettre en parallèle avec les 200 millions de francs attribués par le ministère de la recherche aux sciences de la vie.

Au reste, l'abandon du projet SOLEIL, qui ne peut se justifier pour des raisons budgétaires étant donné le caractère limité de l'investissement, entraînerait des problèmes très cruciaux de réorientation de chercheurs.

Certes la discussion est normale sur les priorités respectives de la science " lourde " et de la science " légère ". Mais le synchrotron diffère en tous points d'un équipement comme le CERN où s'accomplissent annuellement deux à trois expériences difficiles. Au contraire, un synchrotron sert un grand nombre de domaines et quelques centaines de laboratoires en France, pour un total de 1600 chercheurs. En cela, un synchrotron est totalement différent des très grands équipements de la radioastronomie. Il s'agit en réalité d'une " machine de service ".

M. Vincent MIKOL a rappelé à cette occasion qu'ailleurs en Europe, le nombre de synchrotrons augmente et de nouveaux pays s'en dotent, comme la Suisse, par exemple.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI ayant demandé si le CNRS avait chiffré le nombre de lignes de lumière qui lui seront nécessaires, à l'instar du CEA qui l'a établi à 4 lignes équivalent temps plein, **Mme Catherine BRÉCHIGNAC** a indiqué que le recensement des besoins, organisme par organisme, est absurde dans la mesure où c'est l'ensemble de la communauté scientifique française qui est concernée par la question du renouvellement des ressources nationales en rayonnement synchrotron et qu'elle ne fait aucune différence entre un chercheur CNRS, CEA, INSERM ou un universitaire si sa recherche est de bonne qualité.

Ce qui est incontestable, c'est la pression de la demande de temps de faisceau, qui doit, bien sûr, être multipliée par deux si l'on inclut le Royaume Uni dans l'analyse. En l'occurrence, si l'on supprimait une machine sur les deux existantes, LURE et SRS, la pression ne pourrait qu'augmenter à l'avenir, même avec un synchrotron de plus grande taille. Pour répondre à cette question, une étude sur la montée des besoins a récemment été demandée au Conseil scientifique du CNRS.

Il reste que si un nouveau synchrotron devait être construit, son mode de fonctionnement serait selon toute probabilité différent tout en conservant un caractère fédérateur et convivial.

M. Georges CHARPAK ayant demandé confirmation de la réalité des efforts du ministère de la recherche en faveur de la biologie, **M. Edouard BREZIN** a fait état des actions incitatives du ministère en la matière pour un montant de 300 millions de francs et des efforts propres du CNRS qui, pour l'année 2000, sur les 70 millions de francs supplémentaires reçus de l'Etat, en a affecté la moitié à la biologie, tandis que, sur les 350 recrutements prévus, 101 concerneront la biologie. **Mme Catherine BRÉCHIGNAC** a ajouté que le coût de financement d'un synchrotron doit être mis en regard du service qu'il apporte à de multiples disciplines et de sa contribution au

développement des sciences de la vie. En tout état de cause, une machine trop dédiée de basse énergie n'aurait aucun avenir.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur a conclu la réunion en soulignant la nécessité de faire de la prospective au sujet de la biologie.

Certes le souci du ministère en mettant au point une solution autre que SOLEIL est de faire des économies pour renforcer le soutien aux laboratoires, et en particulier à la biologie. Mais un synchrotron moderne est bien un équipement phare de la biologie, de sorte que le bilan de cette stratégie pourrait bien apparaître comme négatif pour la discipline même que l'on entend soutenir.

Par ailleurs, s'agissant de la création d'entreprises de haute technologie, que le ministère souhaite encourager, la localisation des centres de biologie se fera très probablement à l'avenir autour des très grands équipements, et en particulier autour des synchrotrons. En outre, il faut intégrer dans le processus de décision le fait que les entreprises industrielles ne souhaitent pas s'engager elles-mêmes dans des investissements lourds représentant une immobilisation à long terme. Dans ce cas également, la décision d'abandon du projet de synchrotron national pourrait bien s'avérer contraire à l'objectif poursuivi.

Il est donc en définitive capital d'établir une hiérarchie dans les objectifs à long terme de la politique de la recherche.

VII - Auditions de M. Niels MARTENSSON, directeur du Max Lab, et des représentants de la Société Française de Physique, de la Société Française de Biologie et de Biochimie moléculaire et de l'Association Française de Cristallographie - mercredi 9 février 2000

Afin de continuer à obtenir l'avis d'experts internationaux sur la situation française dans le domaine du rayonnement synchrotron, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, et **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, ont invité le Professeur Nils MARTENSSON, Directeur du Max Lab de l'université de Lund (Suède), à leur exposer les réalisations et les projets suédois en la matière.

Ainsi que l'a précisé le **Professeur Nils MARTENSSON**, la Suède dispose avec le Max Lab de deux anneaux de stockage opérationnels, un troisième étant en construction.

L'anneau MAX I, entré en fonctionnement en 1985, est un synchrotron de 2^{ème} génération d'une énergie de 550 MeV (0,55 GeV).

L'anneau MAX II, entré en service en 1997, est un synchrotron de 3^{ème} génération d'une énergie de 1,5 GeV, comparable à ELETTRA (Trieste) et à BESSY II (Berlin). Pour compenser la petite taille de l'anneau, différents moyens ont été utilisés pour atteindre un haut niveau de brillance, sans toutefois parvenir à égaler le nombre de lignes d'ELETTRA.

L'anneau MAX III, actuellement en cours de construction pour une entrée en service en 2002, sera un synchrotron d'une énergie de 700 MeV (0,7 GeV) comparable en taille à Super-ACO du LURE mais doté d'équipements plus modernes.

Le nombre d'employés permanents du Max Lab ressortit à 55 personnes, dont 30 techniciens et administratifs, 10 chercheurs universitaires et 10 à 15 spécialistes apportant une assistance aux utilisateurs. Le nombre d'utilisateurs a atteint 450 à 500 personnes en 1999, un utilisateur étant recensé une seule fois dès qu'il fréquente une fois dans l'année le MaxLab et ceci quel que soit le nombre de ses visites ultérieures.

S'agissant de la répartition du nombre d'utilisateurs par discipline, la biologie représente à l'heure actuelle un peu moins de 30 % des utilisateurs de MAX II, avec une croissance plus rapide que celle de toutes les autres disciplines.

En raison de la croissance des besoins, l'anneau MAX I ne devrait pas être fermé dans un proche avenir, même lorsque le nouvel anneau MAX III sera opérationnel. MAX I, un synchrotron de faible énergie, est en effet utile dans le domaine de la spectroscopie infra rouge ou dans les X "mous", en particulier pour les études de surface et la microélectronique.

En revanche, certaines lignes de lumière de MAX I pourraient être transférées sur MAX III. Etant donné que pour les lignes de lumière de basse énergie en question, le bénéfice d'un éventuel fonctionnement sur MX II ne serait que très légèrement supérieure à celui obtenu en les faisant fonctionner sur MAX III, aucun transfert de lignes de lumière de MAX I à MAX II n'est plus envisagé.

Le synchrotron MAX II de 1,5 GeV a initialement été optimisé pour des énergies inférieures ou égales à 1 keV. Il possède des lignes de lumière pour la cristallographie des protéines, pour la nanolithographie et pour

la lithographie profonde à rayons X. La polarisation circulaire est également mise en œuvre pour les études de surface.

Pour faire face à l'augmentation de la demande dans le domaine de la cristallographie, MAX II subit à l'heure actuelle plusieurs transformations destinées à disposer de faisceaux de plus haute énergie. Grâce à l'installation de "*wigglers*" multiples et supraconducteurs sur deux sections droites, les gestionnaires de MAX II espèrent atteindre des énergies d'environ 20 keV et de flux supérieurs ou égaux à ceux obtenus sur les aimants de courbure de l'ESRF. Après ces transformations, MAX II proposera, à partir des deux sections droites, une ligne de lumière pour les sciences de la matière avec des énergies comprises entre 2,5 et 20 keV et une ligne à plusieurs stations expérimentales dédiées à la cristallographie des protéines pour des longueurs d'onde comprises entre 0,6 et 1,6 Å. A la suite de cette opération, 2 sections droites et 3 aimants de courbure restent disponibles sur MAX II.

Les principales raisons pour lesquelles la construction de MAX III a été entreprise, sont au nombre de trois.

La première raison est la pénurie de sections droites et de lignes de lumière sur MAX II, en raison de la croissance de la demande.

La deuxième raison est le constat fait par la direction du MaxLab de la fermeture en Europe de nombreuses lignes de basse énergie, qui risque d'entraîner la perte de nombreuses possibilités d'expérimentations intéressantes.

La troisième raison est que la construction de MAX III sur le site des deux premiers synchrotrons suédois permettra des économies d'investissement substantielles.

Différents équipements sont d'ores et déjà prévus, dont une ligne de lumière pour la spectroscopie de très haute résolution pour des énergies comprises entre 5 et 40 eV et une autre pour la photoémission résolue angulairement pour des énergies comprises entre 15 et 200 eV, récupérée de MAX I. Mais les lignes devant être issues de 4 sections droites et de 6 aimants de courbure ne sont pas encore financées.

Les dépenses d'investissement correspondant à l'ensemble des installations existant au MaxLab sont estimées à 60 millions d'euros. Le Gouvernement finlandais a participé au financement d'une des lignes de lumière de MAX II et le Gouvernement danois financera une des lignes de lumière dédiées à la cristallographie des protéines.

Au titre de ses recettes annuelles, le Max Lab reçoit 2,2 millions d'euros du Conseil suédois de la recherche, 2,2 millions d'euros de l'université de Lund, 0,47 million d'euros d'une fondation de recherche indépendante, 0,36 million d'euros du programme européen " *Access to Large Scale Facilities* ". Les recettes commerciales de MaxLab provenant de la vente de temps de faisceau à l'industrie représentent pour le moment moins de 0,1 million d'euros. Une croissance de ces recettes est prévue, aussitôt que des nouvelles lignes de lumière seront disponibles.

Les utilisateurs du Max Lab sont à hauteur de 50 % des chercheurs suédois et à hauteur de 25 % des chercheurs d'autres pays de l'Union européenne. Les projets de recherche sont sélectionnés par un comité de programme indépendant. Les frais des utilisateurs européens sont pris en charge par le programme " *Access to Large Facilities* ". Les temps de faisceau pour les projets de recherches propriétaires sont facturés aux prix du marché.

En réponse à une observation de **M. Gilles COHEN-TANNOUJ**I relative au conflit existant sur un synchrotron de 1,5 GeV entre l'intensité du faisceau et sa durée ou sa stabilité, le **Professeur Nils MARTENSSON** a confirmé que MAX II avait été, lors de sa conception, optimisé pour les rayons X " *mous* ". Toutefois, il reçoit désormais de nouveaux dispositifs d'insertion pour la cristallographie des protéines, à savoir des " *wigglers* " produisant des faisceaux optimisés et stables autour de 20 keV, ne nécessitant qu'une injection par 24 heures et sans aucune détérioration de l'émission de l'anneau.

M. Vincent MIKOL ayant remarqué, pour sa part, que la demande de temps de faisceau de rayons X sur les sections droites croît fortement pour la cristallographie jusqu'à devoir représenter sans doute de 40 à 50 % de l'utilisation totale dans les 5 années à venir, le **Professeur Nils MARTENSSON** a confirmé cette évolution, en indiquant qu'on anticipe une demande multipliée par 2 ou 3, dans le même temps, de la part des 6 à 7 laboratoires suédois de biocristallographie.

A l'invitation de **M. Guy OURISSON**, le **Professeur Nils MARTENSSON** a en outre précisé que l'excès de demande de temps de faisceau correspond non pas à des candidatures sans valeur mais à d'excellents projets de recherche qui seraient acceptés en l'absence de pénurie.

Afin de tirer le bilan de l'évolution de MAX II, **M. Pierre POINTU** a interrogé **M. MARTENSSON** sur les choix qui seraient faits pour ce

synchrotron, s'il devait être construit aujourd'hui, compte tenu de l'évolution des besoins et des technologies.

Le **Professeur Nils MARTENSSON** a clairement indiqué que l'énergie choisie serait de 2,5 à 3 GeV, correspondant à un anneau de stockage plus grand et à un nombre de lignes de lumière plus important.

Sur la suggestion de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, le Professeur Nils MARTENSSON a promis de communiquer au groupe de travail une récapitulation des coûts de construction et de montée en énergie du synchrotron MAX II de 1,5 GeV.

Après avoir témoigné leur gratitude au Professeur MARTENSSON pour les informations très importantes qu'il leur a transmis, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur** et **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, ont ouvert la table ronde rassemblant les représentants de la Société Française de Physique, de la Société Française de Biochimie et de Biologie Moléculaire et de l'Association Française de Cristallographie.

*

M. Jean-Paul HURAUULT, Président de la Société Française de Physique (SFP), a indiqué que la société savante qu'il dirige, fondée il y a 125 ans, rassemble 3000 physiciens couvrant l'ensemble des sous-disciplines, depuis la physique de la matière condensée, la physique atomique et moléculaire, la physique nucléaire, jusqu'à la physique des plasmas, la physique des particules et l'astrophysique.

Fait remarquable, la présidence de la SFP est assurée tour à tour et pour une durée de 2 ans, par un physicien universitaire, un chercheur appartenant à un grand organisme et un représentant de la recherche industrielle. M. Jean-Paul HURAUULT, physicien ayant travaillé chez Philips, a souligné que la présente délégation de la SFP reflète cette diversité, avec M. Roger BALIAN, physicien théoricien au CEA, ancien professeur à l'Ecole Polytechnique, membre de l'Académie des sciences et précédent président de la SFP, M. José TEIXEIRA, directeur adjoint du laboratoire Léon Brillouin, Mme Anne-Marie LEVELUT, directeur de recherche au CNRS, spécialiste des études structurales conduites avec des rayons X et Prix Robin 1999 de la SFP.

M. Jean-Paul HURAUULT a souligné combien les physiciens sont concernés par le développement du rayonnement synchrotron en France, que ce soit pour les études de la matière condensée, pour la physique atomique et moléculaire ou pour la physique des plasmas.

Incontestablement, les synchrotrons sont à la pointe des méthodes permettant de mettre en évidence de nouveaux phénomènes. En réalité il existe une fenêtre d'opportunités ouvertes par le rayonnement synchrotron pour une durée d'environ 15 années, pour imaginer de nouvelles expérimentations et faire de nouvelles découvertes. Au-delà des 15-20 prochaines années, d'autres méthodes viendront sans doute concurrencer le rayonnement synchrotron. Mais, dans l'intervalle, les synchrotrons auront une importance stratégique.

Lors des premiers pas du LURE en France, les physiciens et les cristallographes furent les premiers intéressés par le rayonnement synchrotron. Depuis lors, le nombre d'utilisateurs et de disciplines concernées s'est élargi à la métallurgie, à la chimie et à la pharmacie notamment.

Aujourd'hui, la communauté scientifique servie par un synchrotron est très vaste. Les industriels, eux aussi, ont compris l'intérêt de cet équipement et sont à la base de 20 % du temps d'utilisation des faisceaux, avec une montée en régime rapide depuis deux à trois ans.

C'est à la suite de ce constat que la Société Française de Physique, conjointement avec la Société Française de Chimie et l'Association française de cristallographie a, en 1999, attiré l'attention du ministre de la recherche sur l'importance stratégique du rayonnement synchrotron et sur le caractère complémentaire de deux sources, l'une internationale, à savoir l'ESRF, et l'autre, nationale, indispensable pour la formation et la mise au point d'expériences à la pointe de la technique.

Depuis l'envoi de cette lettre, l'urgence s'est encore précisée, avec la pression croissante des industriels, des autres utilisateurs et la découverte de "*nouvelles frontières dans l'imagerie*", notamment en médecine et pour l'étude de la dynamique des phénomènes.

En définitive, la question de nouvelles ressources en rayonnement synchrotron est bien à l'ordre du jour pour "*la vitalité de la science française*".

Afin de disposer d'une vue complète des différentes méthodes d'étude utilisées aussi bien par les sciences de la matière que par les sciences du vivant, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a demandé aux représentants de la SFP de bien vouloir préciser les avantages et les inconvénients respectifs du rayonnement synchrotron, des sources de neutrons, de la RMN et des faisceaux d'électrons et de leurs perspectives de développement.

M. José TEIXEIRA, secrétaire général de la SFP et directeur-adjoint du laboratoire national Léon Brillouin, a alors remarqué que le rayonnement synchrotron a vu son importance augmenter grâce aux progrès apportés par les sources de 2^{ème} et 3^{ème} générations dans les rayons X, tant en intensité qu'en qualité.

C'est ainsi que certains domaines auparavant réservés aux études par diffusion de neutrons, comme les études de magnétisme par exemple, se sont ouverts à la diffusion de rayons X, avec des résultats certes complémentaires mais somme toute meilleurs. D'une manière générale, l'on constate que le domaine des rayons X s'est élargi d'une manière considérable et qu'il va continuer à s'étendre.

Les chercheurs ont tiré les conséquences de ces nouvelles possibilités offertes par les synchrotrons. De nombreux laboratoires constitués autour de sources propriétaires traditionnelles ont abandonné celles-ci pour se regrouper autour des équipements de haut niveau que représentent les synchrotrons, avec comme effet positif additionnel, la multiplication des contacts avec les équipes de haut niveau concevant et exploitant les synchrotrons et avec les utilisateurs d'autres disciplines. On peut ainsi dire que les synchrotrons ont un rôle "*fédérateur*", concentrent les moyens de haute technologie et contribuent au développement de "*compétences croisées*".

Parallèlement au rayonnement synchrotron, les autres techniques se sont aussi développées, mais moins rapidement.

S'agissant des neutrons, on peut estimer qu'il n'y a pas eu de progrès décisif dans les sources au cours des années récentes, la seule perspective importante à cet égard étant la construction de la future source européenne ESS de neutrons produits par spallation qui devrait être installée au Royaume Uni.

Les développements de la diffusion d'électrons sont quant à eux relativement modestes.

La résonance magnétique nucléaire en trois dimensions a fait, pour sa part, des progrès importants. A la suite du plan Bio 2000, différents laboratoires ont été équipés en machines lourdes. La RMN s'est ainsi révélée performante pour la résolution de petites structures comme celles des peptides ou d'autres macromolécules de dimensions réduites. En réalité, il existe une complémentarité de la RMN avec le rayonnement synchrotron qui, lui, peut élucider des structures de très grande taille.

Au total, selon M. José TEIXEIRA, le rayonnement synchrotron a connu dans les années récentes un développement explosif, la RMN un développement rapide et les sources de neutrons et d'électrons un développement "raisonnable".

M. Guy OURISSON a rappelé toutefois qu'en cas d'impossibilité de faire cristalliser une molécule, il ne peut y avoir de résolution de sa structure par cristallographie et donc d'utilisation du rayonnement synchrotron, la RMN se substituant alors à cette dernière technique.

Pour **M. Vincent MIKOL**, le nombre de publications scientifiques faisant état de résultats obtenus avec la RMN est faible, traduisant des investissements limités dans cette technique et donc son impact réduit en biologie structurale. Ce point de vue a été confirmé par **Mme LEVELUT**, qui a souligné qu'avec la diffraction réalisée sur une gamme de longueurs d'onde étendue des rayons UV aux rayons X, le rayonnement synchrotron permet de collecter des informations sur la totalité de l'échantillon et de compléter l'image d'objets de grande taille.

Reprenant le sujet de l'action de la SFP auprès des pouvoirs publics, **M. Roger BALIAN**, Vice-Président et précédent président de la société savante, a rappelé qu'une lettre a été adressée fin 1998 au ministre de la recherche, après une réflexion approfondie de la part des différentes tendances de la SFP et conjointement avec six autres sociétés savantes, à savoir les Sociétés françaises de chimie, de biophysique, de neutronique, le Groupe français des polymères, l'Association française de cristallographie et la Société française de métallurgie et des matériaux. Ce texte fait le point sur les caractéristiques nationales ou internationales de divers types de très grands équipements et sur l'ouverture sur d'autres pays qu'il est nécessaire de prévoir.

Mais pour quelles raisons faut-il un synchrotron sur le sol national ?

Le premier type de raisons est qu'il existe en France une communauté scientifique de spécialistes des accélérateurs et des différents équipements nécessaires à un synchrotron, dont la qualité est de niveau mondial et permettra de conduire cette réalisation au plan national.

Le deuxième type de raisons provient des besoins d'exploration de la matière d'une communauté large et non spécialisée qui a besoin d'être "éduquée, guidée, pilotée" et qui, de surcroît pour les industriels, requiert le secret sur ses expérimentations.

Cette communauté doit avoir accès à des très grands instruments internationaux. Mais il lui faut aussi pouvoir disposer d'au moins un

instrument national exploité par un laboratoire qui assurera l'accueil et la formation des utilisateurs, prendra à sa charge le perfectionnement continu de l'appareil et pourra utiliser le synchrotron d'une manière plus innovante pour des manipulations plus risquées que celles habituellement exécutées sur un grand instrument international dont le comité de programme a le plus souvent pour habitude de sélectionner des projets sans aléas, donnant lieu presque sûrement à publication dans des revues internationales de haut niveau.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a alors analysé la situation européenne dans le domaine du rayonnement synchrotron. Le parc européen de synchrotrons est disparate avec des machines dont l'énergie varie de 0,5 à 6 GeV. Il apparaît toutefois que le synchrotron idéal par le niveau élevé de ses performances et sa polyvalence a une énergie située dans la fourchette 2,5-3 GeV. Il faut en conséquence réfléchir à une harmonisation des synchrotrons de façon à parvenir à une baisse des coûts de construction. Ainsi, selon M. Yves PETROFF, la construction de deux synchrotrons de 2,5 GeV générerait des économies d'environ 30 %. Si un mouvement fort de coordination était engagé, alors des économies d'échelle importantes permettraient de diminuer significativement le prix des synchrotrons. L'objectif doit donc être la coordination des efforts d'investissement des différents pays, en veillant à la complémentarité des lignes de lumière.

M. Roger BALIAN a estimé qu'il s'agit là d'une "*bonne direction*". Dans l'échange qui a suivi, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a estimé toutefois que "*l'évolution ne se fait pas, pour le moment, dans le bon sens*". La communauté scientifique n'attend pas l'évolution des politiques pour établir des contacts. En réalité les chercheurs vont à l'étranger lorsque les instruments sont mieux adaptés à leurs besoins et qu'ils peuvent y nouer des contacts au meilleur niveau de compétence.

M. José TEIXEIRA a alors noté que les premiers très grands instruments sont nés d'accords bilatéraux, ainsi pour l'Institut Laue-Langevin (ILL), entre la France et l'Allemagne, ensuite rejointes par la Grande-Bretagne. En réalité, les pays tentent d'implanter sur leur sol des équipements utilisés par l'ensemble de l'Europe, d'où des risques de surdimensionnement de ces installations. Ainsi, le réacteur nucléaire en construction à Munich a vu sa taille déterminée non pas par les seuls besoins nationaux mais pour répondre à l'objectif d'une ouverture aux Pays de l'Est. Au vrai, entre les pays européens, il s'agit plus d'une compétition que d'une collaboration. L'absence d'une concertation politique est regrettable car elle empêche une véritable optimisation,

ainsi en ce qui concerne la source ESS de neutrons froids dont le Royaume Uni souhaite qu'elle soit la plus puissante possible.

M. José TEIXEIRA a estimé que dans le domaine du rayonnement synchrotron, une opportunité a été manquée de collaborer étroitement avec l'Europe du Sud.

Il a par ailleurs observé que la fermeture par l'Italie de son dernier réacteur nucléaire d'étude a entraîné une déshérence de la communauté italienne des neutroniciens. Bien sûr les spécialistes italiens viennent réaliser des expériences à Saclay et à l'ILL de Grenoble. Mais le terreau que constitue une installation nationale n'existant plus, la communauté nationale " s'effondre ". A cet égard, M. Roger BALIAN a noté qu'une installation internationale comme l'ILL peut jouer le rôle de " pépinière " pour la communauté scientifique française sur le sol de laquelle le grand instrument est implanté mais ne remplit pas l'indispensable rôle de " maternage " pour d'autres pays.

Ainsi que l'a résumé **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, la disparition d'un grand instrument scientifique fait disparaître la communauté scientifique qui l'a utilisé.

M. José TEIXEIRA a souligné à cet égard qu'un grand instrument nécessitant la construction et la maintenance de nombreux appareils, une industrie proche des chercheurs se crée autour de celui-ci dont l'avantage revient au pays d'accueil. Le cas de la neutronique en Italie est éclairant à cet égard : s'il reste quelques spécialistes italiens, ceux-ci se sont égayés en Europe et toute " vision horizontale " allant de la création de machines à la mise au point d'expériences a disparu.

A la demande de **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, le **Professeur Niels MARTENSSON** est revenu sur les conditions d'accueil des chercheurs étrangers sur les anneaux MAX I, II et III de l'université de Lund.

Les chercheurs étrangers sont étroitement assistés par les spécialistes résidents pour la réalisation de leurs expériences. Trois catégories de visiteurs doivent toutefois être distinguées : d'une part les chercheurs qui réalisent des projets indépendants, d'autre part les chercheurs travaillant en collaboration avec des chercheurs suédois et enfin, les chercheurs de pays qui ont participé au financement des installations et qui bénéficient de prestations et de possibilités d'expérimentations dépassant de loin leur investissement.

*

Après avoir entendu le point de vue des représentants de la Société française de physique, les Rapporteurs ont donné la parole au **Professeur Claude LECOMTE**, Président de l'Association française de cristallographie.

L'Association française de cristallographie fondée en 1945 par le Professeur CURIEN, fédère les chercheurs spécialistes des rayons X qu'ils soient physiciens, chimistes, biologistes ou minéralogistes. Cette association, par nature interdisciplinaire, comprend 400 membres répartis en différents groupes thématiques, dont le plus actif est celui de la biologie.

Pour l'étude de la structure de la matière, les rayons X s'avèrent être la sonde idéale, utilisée tant pour les matériaux, les molécules chimiques que pour les protéines et les ensembles supramoléculaires. Les cristallographes sont de fait de gros consommateurs de rayonnement synchrotron dans des gammes d'énergie situées entre 60 keV et 5 keV et de longueurs d'onde situées entre 2,5 et 0,2 Å, pour des analyses de structure, de densité électronique et de topographie. Parmi les méthodes nécessitant le rayonnement synchrotron, figurent actuellement les méthodes utilisant la dispersion anormale permettant soit un phasage des facteurs de structure, soit un contraste meilleur entre éléments de numéros atomiques voisins.

La communauté française du rayonnement synchrotron fait preuve d'un savoir-faire unique. La transmission de ce savoir-faire aux jeunes chercheurs exige un synchrotron national. Sur les grands instruments internationaux comme l'ESRF ou le synchrotron d'Argonne, aux Etats-Unis, les chercheurs restent peu longtemps, une journée pour les biologistes et de un à deux jours pour les physiciens, et sont étroitement encadrés par les chercheurs résidents. Ce qui présente un avantage en terme de rapidité d'exécution constitue une limite en terme d'élargissement des compétences des chercheurs visiteurs. En réalité, les utilisateurs extérieurs ont peu de marge de manœuvre pour infléchir une expérience dans une direction donnée.

Au surplus, le comité de programme de grandes installations comme l'ESRF a tendance à sélectionner des projets de recherche certes d'un excellent niveau mais aussi d'une faisabilité certaine et immédiate, susceptibles de surcroît de donner lieu à publication dans des revues scientifiques de haut niveau international comme "*Nature*" ou PRL.

On programmera, en conséquence, une expérience difficile et risquée dans un synchrotron national plutôt qu'à l'ESRF. Ceci n'empêche pas par ailleurs des publications dans des revues prestigieuses.

Un centre national de rayonnement synchrotron est également indispensable en ce qu'il associe à des moyens matériels, des équipes de recherche autour de ceux-ci, un enseignement de haut niveau et un nombre important de chercheurs "*doctorants*" ou "*post docs*". En outre, un synchrotron est par essence un équipement multidisciplinaire qui permet le meilleur transfert de connaissances de la physique à la biologie, en particulier.

Enfin, un équipement national est indispensable car il permet la non-dépendance vis-à-vis de l'extérieur.

Ceci ne veut pas dire que la coopération internationale ne soit pas nécessaire, mais signifie qu'une idée puisse être explorée et mise en œuvre en France, en toute liberté. Les exemples sont à cet égard nombreux d'initiatives et de nouvelles méthodes qui ont pu aboutir ou être mises au point grâce au LURE.

Or les progrès enregistrés dans le domaine du rayonnement synchrotron sont très importants et ne devraient pas ralentir dans les prochaines années. Grâce aux synchrotrons, on sait déterminer la structure de poudres avec 100 atomes par maille et celle de cristaux de quelques microns de longueur. On sait également étudier les structures cristallines de surface, mettre en évidence les défauts de cristaux par topographie X, examiner la diffusion de nanoparticules, obtenir des détails subatomiques comme la densité électronique, ou analyser des réactions in situ en temps résolu.

De plus, la résolution de structures biologiques classiques et celle de structures supramoléculaires (résolution de 1 à 3 Å) et aussi d'amas de protéines de (quelques millions d'atomes) à la résolution de 3 à 15 Å fait l'objet d'une demande en croissance exponentielle.

Pour toutes ces études, une seule méthode existe, l'utilisation de rayons X produits par des synchrotrons.

Dans ces conditions, ce que veulent les cristallographes, c'est une source de rayonnement synchrotron de 3^{ème} génération, de haute énergie, délivrant des faisceaux de photons stables dans le temps et dans l'espace, avec des énergies de 5 à 60 keV, dotés d'excellentes optiques focalisantes et d'un accès facile et rapide, ce que l'ESRF n'assure pas en raison des délais de 6 mois à 1 an entre la soumission d'un projet et l'accès aux faisceaux pour réaliser l'expérience.

En outre, autour de l'équipement qui ne saurait se résumer à un centre de services, il faut aussi des laboratoires auprès desquels les

chercheurs trouvent une assistance non seulement à la réalisation d'une expérience mais aussi à la conception de celle-ci. Au surplus, le futur synchrotron doit s'inscrire dans un centre universitaire, être assorti d'une informatique très puissante et être accessible très rapidement, certains échantillons ayant une durée de vie inférieure à une journée.

*

La parole a ensuite été donnée par les Rapporteurs au **Docteur Richard GIEGÉ**, Président de la Société française de biochimie et de biologie moléculaire.

Ainsi que l'a indiqué le Dr. GIEGÉ, la Société française de biochimie et de biologie moléculaire (SFBBM), créée en 1914, rassemble deux mille membres, appartenant tant au secteur privé qu'académique.

La biologie structurale est "*omniprésente*" dans les manifestations et les congrès de la SFBBM, qui accorde un intérêt ancien à l'étude des structures en trois dimensions. A cet égard, la communauté scientifique française a joué un rôle important dans le domaine de la cristallogénèse, un domaine d'une importance croissante en physico-chimie et en biologie. La SFBBM anime des groupes thématiques notamment dans les domaines émergents, comme par exemple la recherche et l'ingénierie des protéines, les métalloenzymes ainsi que la structure et la biologie de l'ARN. La question des acides nucléiques constitue un problème important pour la cristallographie. La connaissance de leurs interactions avec les protéines pour la traduction du code génétique s'est améliorée et le sera encore davantage à l'avenir.

Au vrai, il existe de plus en plus de laboratoires "*fournisseurs*" de biomolécules et demandeurs d'analyses cristallographiques, afin de comprendre leurs fonctions grâce à la connaissance de leur structure.

Si la RMN est une technique importante, elle n'a d'utilité que pour des structures de petite taille, telles que celles de petites protéines ou des fragments d'acides nucléiques. Cependant à l'avenir, la recherche portera de plus en plus sur des protéines de grande taille et sur les assemblages de macromolécules et les complexes entre protéines, de sorte que, déjà indispensable, le rayonnement synchrotron le sera encore davantage à l'avenir.

Les données de diffraction issues du rayonnement synchrotron sont obtenues avec une qualité et une rapidité de plus en plus grandes. Si la France veut rester compétitive, elle doit suivre cette tendance.

Au reste, la biologie structurale " se démocratise " et devient quasiment une routine. Bien sûr, il est nécessaire de disposer de bons cristaux et c'est pourquoi la cristallogénèse doit se développer. Mais le mouvement actuel est que la résolution des structures ne se fait plus uniquement dans le cadre des laboratoires de biologie structurale, avec leurs moyens propres de cristallographie. Au contraire, la maîtrise de la cristallogénèse permet de plus en plus facilement de faire des clichés sur des synchrotrons, de telle sorte que des laboratoires de biochimie et de biologie de plus en plus nombreux vont résoudre des structures cristallographiques.

Une autre tendance fondamentale est la croissance de la génomique structurale. Avec des méthodes éprouvées de cristallisation et l'enregistrement rapide des données que permettent les synchrotrons à haute brillance, un travail systématique de résolution des structures est désormais possible, sans connaître a priori les fonctions des protéines. Ainsi, les Etats-Unis se sont fixé comme objectif de connaître dans les 15 à 20 prochaines années, les structures de toutes les protéines. La justification de ce travail gigantesque est qu'à partir de la connaissance de la structure des protéines, il sera possible de connaître leurs fonctions.

A ce stade de l'exposé du Dr. Richard GIEGÉ, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur** a remarqué que la communauté des biologistes français donne l'impression de se sentir mal traitée, à la fois par l'insuffisance des crédits de la biologie au CNRS et par les déclarations de certains hauts responsables de la recherche qui voient dans l'accès à un synchrotron britannique, l'occasion pour la biologie française d'élever son niveau.

En réponse, le **Dr. Richard GIEGÉ** a estimé que si les besoins scientifiques sont réels, alors il faut " envisager des solutions ".

Il est vrai que les cloisonnements entre disciplines sont trop grands en France, par rapport à ce qu'ils sont aux Etats-Unis, par exemple. Mais les applications futures des biotechnologies et de la pharmacie exigent la résolution de structures, aussi bien en ce qui concerne les protéines natives et les protéines mutantes.

Les biologistes peuvent en effet fabriquer des acides nucléiques artificiels et des protéines mutantes, qui pourraient avoir des applications très importantes à l'avenir. Une protéine comprenant environ 500 acides aminés, si l'on en change 2 ou 3, celle-ci peut devenir inactive ou devenir active dans un autre domaine. Or, une maladie peut être due à une protéine mutante, ainsi dans le cas de

l'hémoglobine falciforme, dont un acide aminé muté provoque un changement de structure et de fonction. Pour l'étude de ces protéines mutantes, le rayonnement synchrotron est indispensable. Au total, la demande est croissante pour la diffraction de haute résolution et pour la très haute résolution qui apporte des détails atomiques voire subatomiques, dont la France détient d'ailleurs le record mondial avec une résolution de 0,64 Å.

A l'initiative de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, un débat s'est engagé à ce moment sur les avantages respectifs de la RMN et du rayonnement synchrotron.

Pour le **Dr. Richard GIEGÉ**, ces deux méthodes ne doivent pas être opposées, car elles sont complémentaires. Pour **M. Guy OURISSON**, dans les conditions actuelles, la RMN ne permet l'étude des structures des protéines que dans le cas où leur nombre d'acides aminés ne dépasse pas 150. Mais, si des percées technologiques sont faites sur les aimants, alors la RMN permettrait l'étude de structures de plus grande taille, avec l'avantage de pouvoir étudier des structures non cristallines ainsi que les interactions en solution. Au reste, *" il n'y a pas de compétition entre le rayonnement synchrotron et la RMN mais une complémentarité "*.

En tout état de cause, pour le **Dr. Richard GIEGÉ**, la RMN à 1 MHz avec ses applications en biologie structurale constitue un rêve à long terme. Pour **M. Guy OURISSON**, les Etats-Unis et le Japon investissent de sommes importantes dans le développement de cette technique dont l'horizon est toutefois de quelques dizaines d'années – 50 ans peut-être -.

M. Vincent MIKOL estime, quant à lui, qu'à terme, ces efforts déboucheront sur des résultats, mais que, pour le moment, les *" start up "* américaines qui se lancent dans l'étude systématique des protéines, utilisent toutes le rayonnement synchrotron et aucune la RMN.

A l'initiative de **M. Vincent MIKOL**, une deuxième discussion s'est alors amorcée sur la préférence que donneraient les laboratoires de biologie à l'augmentation de leurs crédits ou à la mise en service de nouvelles ressources en rayonnement synchrotron.

Pour le **Dr. Richard GIEGÉ**, le débat ne pose pas dans ces termes. Bien sûr, si la construction d'un nouveau synchrotron devait entraîner la division par un facteur 3 ou 4 de leurs crédits, les laboratoires de biologie refuseraient un tel équipement. Mais pour les biologistes, la

proximité d'un synchrotron et un accès rapide à la machine avec des durées d'expérience très réduites sont des critères essentiels, notamment dans la perspective de pouvoir réaliser des essais sur des cristaux de très petite taille.

A cet égard, comment la communauté des biologistes français ressentirait-elle l'obligation de devoir se rendre sur une machine étrangère pour faire ses clichés, a demandé **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur ?**

Pour le **Dr. Richard GIEGÉ**, il ne s'agit pas de vouloir "*bétonner*". La science est ouverte par essence, et des collaborations existent dans tous les domaines. Mais, "*dans un certain nombre de domaines, il faut un savoir-faire de proximité*". Ainsi dans le cas de la cristallisation du ribosome, un domaine que la France a "*raté*", des années d'essais sont nécessaires avant d'obtenir des résultats, de sorte que c'est un avantage indéniable de pouvoir faire des manipulations de contrôle à proximité et sans passer par des systèmes drastiques de sélection des projets par des comités de programme.

Pour préparer l'avenir et permettre à la communauté des biologistes de croître, il est ainsi indispensable d'avoir un accès souple et rapide à un synchrotron, donc à un synchrotron national.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI a remarqué à cet égard que la rapidité d'accès provient de la proximité de l'installation par rapport aux utilisateurs mais résulte aussi de l'absence de pénurie de lignes, auquel cas les délais d'accès ne peuvent qu'augmenter.

A cet égard, le **Dr. Richard GIEGÉ** a noté qu'il existe dans de nombreux pays, des projets de construction de synchrotrons, y compris de synchrotrons régionaux. Dans les arguments en faveur de ces projets, la notion de lieu de rencontres interdisciplinaires vient en bonne place. Les synchrotrons sont en effet des installations où germent des idées nouvelles.

"Ce savoir-faire, où la France a été pionnière, s'il est détruit, sera difficile à reconstituer". En tout état de cause, il s'agit d'un choix stratégique. La biologie structurale a pris naissance au Royaume Uni, avec le premier cliché obtenu dans un laboratoire de zoologie par Mme Hodgkin. La mise au point des méthodes de la cristallographie a été longue. Il a fallu plus de 20 ans à Max PERUTZ pour mettre sur pied les techniques actuelles de résolution des structures des protéines. De fait, c'est au Royaume Uni, leader de ces techniques, que se sont formés les pionniers.

Mais, alors qu'elle avait été, elle-même, pionnière dans la cristallographie minéralogique, pourquoi la France a-t-elle pris du retard dans la biologie structurale, il y a trente ans ?

Au vrai, " il y a 30 ans, les décideurs de la politique de la recherche ont jugé que la biologie structurale était trop chère et exigeait des moyens trop lourds ". Alors que la génétique et la biologie cellulaire se développaient d'une manière satisfaisante à cette période, les moyens alloués à la biologie structurale ont été jugés suffisants, malgré leur faible poids.

Il y a trente ans, on parlait déjà des nécessités du développement des laboratoires. En réalité, la culture de la cristallographie était peu étendue en France. Ce sont les chercheurs français ayant séjourné à l'étranger qui, à leur retour et à leur initiative, ont relancé cette discipline. Qu'on dise aujourd'hui qu'il est nécessaire de détacher des chercheurs français à Oxford pour relever le niveau de cette discipline est "*dégradant*" pour les pionniers qu'ils furent.

Au reste, les responsables de la politique de la recherche qui ont estimé préférable de développer d'autres disciplines, ont commis une lourde erreur qu'il ne faut pas renouveler. En réalité, il fallait investir dans tous les domaines et ne pas abandonner une discipline particulière dont l'importance stratégique peut se révéler ultérieurement.

Sur ce point, **M. Guy OURISSON** a ajouté que le point de départ des études des structures des molécules a été le laboratoire central des poudres, un centre non ouvert sur l'extérieur, ce qui n'a pas contribué à la vitalité scientifique de la discipline, notamment parce qu'il s'agit d'un centre peu ouvert sur l'extérieur et spécialisé dans les "*petites*" molécules. Autre cause des difficultés françaises en cristallographie, figure, selon **M. LECOMTE**, l'impossibilité de disposer à l'époque d'une informatique performante, en raison du monopole de Bull pour les commandes des administrations françaises.

En tout état de cause, pour le **Dr. Richard GIEGÉ**, la France a aujourd'hui rattrapé son retard en biologie structurale. Dans le domaine stratégique du rayonnement synchrotron, "*si l'on ne suit pas la tendance, on risque de tout perdre*".

M. Jean GALLOT a souligné combien il est nécessaire de distinguer les besoins proprement nationaux des nécessités d'une coopération internationale ciblée. En tout état de cause, il faut garder la maîtrise des accès aux lignes de lumière, non seulement pour pouvoir les faire évoluer, mais aussi pour réaliser des expériences "*exotiques*" à la

limite des technologies existantes et enfin pour assurer la formation des jeunes chercheurs.

En réalité, ce dernier point est d'une importance capitale. Une communauté scientifique peut disparaître par éclatement et également par manque de jeunes chercheurs renouvelant ses cadres.

Le **Dr. Richard GIEGÉ** a confirmé, à cet égard, qu'un tel phénomène peut aller très vite. Le problème de la formation est absolument crucial. Les chimistes français ne se sont spécialisés en biochimie que très récemment. Les thèses en cours dans ce domaine exigent un environnement satisfaisant. Au reste, la cristallographie va "se démocratiser" dans le futur, notamment si les méthodes de cristallisation font des progrès. De plus, un nouveau domaine d'étude se profile à l'horizon, avec l'étude temporelle des réactions enzymatiques au sein des cristaux, qui conduiront à des images quasiment "cinématographiques" de l'action des protéines.

M. José TEIXEIRA est ensuite revenu sur la remise en cause actuelle des très grands équipements. Un ensemble de physiciens, emmenés par M. Pierre-Gilles de GENNES, mettent l'accent sur l'observation et l'invention d'expériences originales conduites avec peu de moyens. En tout état de cause, il ne semble pas opportun d'opposer cette démarche à la physique des mesures, qui représente le gros des travaux de cette discipline. Même la physique appliquée nécessite des mesures et dans certains domaines, il faut des très grands équipements pour les réaliser. Ces deux visions de la physique en réalité cohabitent et ne sont pas contradictoires.

Au vrai les très grands équipements ont un défaut majeur, celui de nécessiter la sélection des projets d'expériences, ce qui entraîne d'une part une lourdeur dans la conduite de la recherche et d'autre part un privilège de fait donné aux expériences "marchant à coup sûr". Dans ce cas également, l'exigence de rentabilisation d'équipements lourds ne doit pas être exclusive de l'accueil d'expériences plus originales et donc plus aléatoires : "il y a certes de la place pour des expériences géniales sur les très grands équipements".

M. Roger BALIAN a approuvé cette idée de complémentarité de la physique de l'observation et de l'imagination et de la physique des mesures, en tant que théoricien et membre du Conseil des très grands instruments. Ce conseil, dont les attributions devraient être reprises par le Conseil supérieur de la recherche et de la technologie avec le même mode de fonctionnement, présentait l'avantage de rassembler un petit

nombre de scientifiques de tous bords, siégeant à titre personnel et non pas en tant que représentant d'une communauté particulière.

L'une des conclusions majeures du Conseil a été l'importance de maintenir un équilibre entre les différents investissements de la recherche.

Le premier équilibre à respecter est celui qui doit exister entre les sous-disciplines. Ainsi, dans le domaine de la biologie, s'il existe une compétence particulière dans un domaine, il faut veiller à ne pas abandonner pour autant les compétences dans les autres.

Le deuxième équilibre à respecter est celui qui doit exister entre les différentes techniques. Ainsi, il est nécessaire de développer à la fois le rayonnement synchrotron, la RMN et les sources de neutrons. Il faut éviter de souscrire aux modes qui peuvent inévitablement se produire. En tout état de cause, le rayonnement synchrotron "*n'est pas une mode*".

Le troisième équilibre à respecter est celui d'une répartition égale entre le recours aux moyens internationaux et la mise à disposition de moyens nationaux. Sensible en 1994-1996 à la nécessité de développer des coopérations européennes, le Conseil des grands instruments a recommandé que des contacts soient pris à cet effet avec la Suisse et l'Italie. Cette concertation n'a malheureusement pas abouti, alors qu'elle aurait probablement permis d'atteindre une bonne complémentarité entre les synchrotrons européens.

A la demande de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, qui s'est enquis de savoir si la réalisation de l'avant-projet SOLEIL s'était accompagnée d'une ouverture sur l'extérieur, M. Roger BALIAN a indiqué que, si les utilisateurs, au demeurant nombreux et peu structurés, étaient prêts à coopérer, la communauté des concepteurs de synchrotrons, concentrée pour sa part et compétente, n'était pas prête à renoncer à construire la machine par elle-même.

Le quatrième équilibre est celui qui doit exister entre les équipements de base des laboratoires et les très grands instruments, étant admis que les deux sont souvent complémentaires, les équipements propres servant notamment à préparer les expériences sur les très grands instruments. Au reste, l'avantage d'un synchrotron doit être noté en ce qu'il est partagé par une multitude de laboratoires. On a pu calculer à cet égard que l'équipement des laboratoires français en appareils de rayons X au demeurant bien moins performants coûterait beaucoup plus cher que la construction d'un synchrotron.

S'agissant des discussions intervenues avec d'autres pays pour une coopération dans le domaine des synchrotrons, **M. Vincent MIKOL**, membre du conseil scientifique de SOLEIL de 1996 à 1998, a précisé que l'Italie avait déjà entamé la construction d'ELETTRA et que la Suisse avait déjà pris la décision de construire sa propre machine. Des discussions ont eu lieu avec le Royaume Uni mais le projet SOLEIL était beaucoup plus avancé que les premières réflexions britanniques.

Répondant à une remarque de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, sur l'importance des rencontres entre les utilisateurs, **M. Roger BALIAN** a estimé que sans doute, en 1994, alors que le projet semblait acquis, les partisans de SOLEIL n'ont pas sans doute suffisamment popularisé le rayonnement synchrotron.

Il reste que, pour le **Dr. Richard GIEGÉ**, l'existence d'un centre comme le LURE est importante non seulement pour la réalisation d'expériences concrètes mais aussi pour l'émergence et le développement d'une communauté scientifique. En tout état de cause, l'accès à un tel centre doit être facile et rapide. La proximité de laboratoires permet le meilleur plan de charge pour la machine, en permettant des remplacements de dernière minute en cas d'échec dans la préparation des échantillons, par exemple.

Mme LEVELUT a insisté, à cet égard, sur le fait que les coopérations entre disciplines, même si elles peuvent se faire à l'étranger, sont plus faciles à mettre en œuvre entre laboratoires français.

En conclusion à ce débat, **M. Jean GALLOT** a souligné que la coopération européenne qui semble la plus intéressante pour l'avenir du rayonnement synchrotron, est d'une conception nouvelle, en ce qu'elle vise non pas la construction d'un équipement commun mais l'obtention d'économies d'échelles dans des réalisations nationales coordonnées certes, mais non uniformisées.

Approuvant cette orientation, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a demandé toutefois que l'on vérifie si le Royaume Uni est demandeur d'une telle coopération.

Pour **M. Jean GALLOT**, il apparaît que le Gouvernement britannique est convaincu de la nécessité d'un nouveau synchrotron national et que, du fait des pressions du Wellcome Trust, l'implantation à Oxford plutôt qu'à Daresbury semble l'emporter. Mais, en tout état de cause, M. Jean GALLOT estime qu'il ne faut pas opposer équipements des laboratoires et très grands équipements.

M. Roger BALIAN a également estimé qu'il peut apparaître des synergies entre les différents pays partenaires. L'exemple de VIRGO, projet relatif à la mise en évidence des ondes gravitationnelles, montre qu'une coopération tripartite, en l'occurrence entre la France, l'Italie et indirectement les Etats-Unis, peut être profitable pour tous les partenaires. Il en est de même pour la coopération franco-américaine sur le laser MégaJoule. Toutefois, il convient de ne pas oublier que les négociateurs britanniques sont parmi les meilleurs et que si le Royaume Uni décide de s'associer à la France dans ce domaine, il faudra veiller à ne pas lui offrir sans contrepartie l'avant-projet détaillé SOLEIL.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, et M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, ont ensuite levé la séance, après avoir remercié l'ensemble des participants pour leur précieux concours.

VIII - Auditions des représentants du LURE, de M Philippe LAREDO, de M. Paul CLAVIN et de M. Jean-Claude LEHMANN - mercredi 23 février 2000

Après s'être proposé de rendre compte de son déplacement au Royaume Uni au fur et à mesure des discussions, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, Rapporteur** a ouvert la réunion en remerciant les représentants du LURE d'avoir bien voulu étudier, à l'invitation du groupe de travail et dans des délais très brefs, "*les déterminants du coût des synchrotrons et les moyens de limiter les dépenses d'investissement et de fonctionnement afférentes*".

Au nom des représentants du LURE, **M. Jean DAILLANT** a alors commencé d'exposer les résultats de cette importante étude.

En se basant sur les calculs réalisés pour l'avant-projet détaillé SOLEIL, M. Jean DAILLANT a indiqué que le coût de construction hors salaires du cœur d'un synchrotron, c'est-à-dire le coût de l'injecteur, de l'anneau de stockage, des dispositifs d'insertion et des têtes des lignes de lumière, représente 32 % du coût total de construction hors salaires d'un synchrotron.

Les expériences, c'est-à-dire les lignes de lumière proprement dites avec leur optique, les stations expérimentales et les laboratoires associés, comptent, quant à elles, pour environ 28 % du total.

Le complément à 100, soit 40 %, est constitué des bâtiments et des infrastructures, en particulier les équipements informatiques, ordinateurs et réseaux.

La question de l'influence de l'énergie de la machine sur son coût final a aussi été examinée en détail par l'équipe du LURE. Plusieurs cas de figure ont été distingués.

Le premier est celui d'une machine figée à 1,5 GeV. Selon sa taille déterminée par le nombre et la longueur de ses sections droites, son coût varie entre 820 et 1180 millions de francs.

Les points de repère pour le calcul sont les synchrotrons MAX II (Suède) d'une circonférence de 90 m et l'ALS (Berkeley) d'une circonférence de 210 m. Il ressort de l'analyse que l'on peut conduire sur ces exemples, qu'il existe une taille optimale pour une machine de 1,5 GeV, avec une circonférence de 260 m, la circonférence constituant une variable explicative pertinente.

Selon la taille réduite ou optimale de l'anneau de stockage, le coût de construction – investissement et fonctionnement hors salaires - d'un synchrotron de 1,5 GeV s'élèverait donc à 1 milliard de francs \pm 150-200 millions de francs.

Ce coût est à mettre en regard de celui de SOLEIL, qui, suivant les mêmes bases de calcul, atteint 1,35 milliard de francs. Au reste, une telle machine de 1,5 GeV ne correspond à aucune demande de la communauté scientifique. Elle ne correspond pas en particulier aux normes d'une machine moderne. Ses caractéristiques de fonctionnement seraient très dégradées. La durée de vie des faisceaux serait réduite d'un facteur 10 environ et la brillance s'effondrerait pour les photons au-dessus de 3 keV.

Au surplus, son apport devrait de toute façon être complété par des accès à des machines étrangères, en l'occurrence 7 lignes de lumière sur DIAMOND, ce qui augmenterait la dépense totale de près de 36 % par rapport à celle de SOLEIL.

Si l'on prend l'hypothèse d'une machine de 1,5 GeV susceptible d'être portée à 2,5 GeV, il faut alors d'entrée construire un anneau de 337 m comportant les 16 cellules d'une machine de 2,5 GeV. La réduction de coût serait dans ces conditions de 3 % par rapport à la construction d'un synchrotron de 2,5 GeV. Au reste, cette différence de 3 % serait annulée par les dépenses ultérieures d'augmentation d'énergie de la machine.

Un autre point important pour l'évaluation des différents projets en cours est celui du coût des lignes de lumière. Généralement, le coût du dispositif d'insertion, qui est de 1,7 à 2 millions de francs, et celui de la

tête de ligne, soit environ 1 million de francs, sont compris dans celui de l'anneau de stockage proprement dit. La nature du dispositif d'insertion, aimant de courbure, "*wiggler*" ou onduleur influe sur le coût de l'aval, dans la mesure où l'on plantera une optique de la meilleure qualité possible pour tirer parti des qualités d'un faisceau provenant d'un onduleur et obtenir la meilleure focalisation pour corriger l'étendue horizontale du pinceau produit par un aimant de courbure.

Sous réserve de ces précisions et en considérant les différentes méthodes expérimentales associées aux différentes longueurs d'onde, le coût d'investissement hors salaires d'une ligne de lumière varie de 13 à 18 millions de francs. A ce montant, il faut rajouter les salaires correspondant à la période des 4 années nécessaires à la construction et à la mise au point de la ligne.

Une autre question avait été posée par le groupe de travail, portant sur la possibilité effective d'étaler dans le temps la charge d'investissement. Il s'agit en l'occurrence de différer l'équipement de certaines sections droites et l'installation de diverses lignes de lumière. Cette stratégie a été adoptée lors du lancement de l'ESRF, avec un étalement sur une période de 11 ans de la construction des lignes dites publiques et des lignes CRG ("*collaborative research group*"). En raison de son efficacité pour répartir les dépenses, la méthode a été reprise dans l'avant-projet détaillé SOLEIL, selon une programmation des investissements sur 8 ans. Pour M. Jean DAILLANT, le choix d'une période plus étalée conduirait à un "*gâchis*".

En raison de son importance à la fois en terme de coopération européenne et en termes budgétaires, il avait été enfin demandé par le groupe de travail un chiffrage des économies d'échelle susceptibles d'être dégagées par les effets de série résultant de commandes multiples et regroupées, une situation correspondant à la construction concertée, dans deux pays différents, de plusieurs synchrotrons similaires ou dotés d'équipements voisins.

Le premier constat fait par l'équipe du LURE est qu'évidemment les frais de construction des bâtiments et des infrastructures ne peuvent être significativement réduits par un quelconque effet d'échelle, étant par nature confiés à des entrepreneurs locaux. En revanche, pour certains équipements comme les radiofréquences, des baisses de coûts d'environ 10 % pourraient résulter d'effets de série.

Au reste, les équipements comme les aimants et les multipôles d'un seul synchrotron excèdent les capacités de fabrication d'un seul

fournisseur. Il paraît difficile, dans ces conditions, d'obtenir une baisse des coûts par effet de volume.

En définitive, les seules économies d'échelle significatives qui pourraient être faites concernent la recherche et développement, lors de la conception de la machine et au cours de son exploitation. Ces économies ont été observées dans le cadre de collaborations du LURE avec la source suisse SLS ou à l'occasion de la fourniture de dispositifs expérimentaux à d'autres centres de rayonnement synchrotron. Il s'agit alors de prestations de services voire de la fourniture d'équipements, qui constituent des recettes pour le fournisseur et abaissent son prix de revient.

Dans la discussion qui a suivie sur ce dernier point, **M. Gilles COHEN-TANNOUDJI** a précisé qu'effectivement, dans le cas des aimants hexapôles ou quadrupôles utilisés sur un même synchrotron, la commande s'assortit de délais courts. Mais si l'on construit de manière concertée une deuxième machine, des économies d'échelle pourraient apparaître. Sur ce point, tant **M. Jean JERPHAGNON** que **M. Jean GALLOT** ont insisté sur la nécessité de jouer sur la gamme des temps et de prévoir un plan de charge pour dégager de telles baisses de coûts.

Mme Marie-Paule LEVEL précise que la fabrication des dipôles, quadrupôles, hexapôles s'étalent sur plus de deux ans pour chaque type.

M. Pierre POINTU a, quant à lui, indiqué que les spécialistes du Rutherford Appleton Laboratory (CLRC) rencontré à Didcot, le 22 février, estiment que le nombre réduit de fournisseurs aurait plutôt pour conséquence de leur permettre d'augmenter leurs prix, à moins d'un étalement dans le temps susceptible de conforter leur activité sur longue période.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI s'est interrogé par ailleurs sur la validité scientifique du concept de synchrotron dédié. Dans la mesure où toutes les disciplines scientifiques ont besoin de faisceaux stables, bien focalisés et d'une énergie suffisante, l'on ne voit pas à quoi pourrait correspondre une machine spécialisée.

Pour sa part, **M. Georges CHARPAK** a fait état de sa perplexité quant aux affirmations entendues de différents côtés. Les uns estiment qu'une énergie de 1,5 ou de 1,7 GeV est suffisante. Pour autant, les biologistes britanniques souhaitent plutôt une machine de 3 GeV. D'où, sans doute, l'opinion de certains sur le fait que l'énergie prévue pour SOLEIL, soit

2,5 GeV, représente l'optimum pour toutes les disciplines, à mi-chemin des exigences de chacun. Il n'en reste pas moins que si le Royaume Uni et la France ne formaient qu'un seul pays, deux machines identiques de 2,5 GeV ne seraient sans doute pas construites.

Pour faire le tri entre ces différents points de vue, **M. Roger FOURME** a estimé qu'il était nécessaire de reprendre les données de base. La cristallographie des protéines requiert des faisceaux d'une énergie de 12 keV, correspondant à des longueurs d'onde d'environ 1 Å. Pour obtenir des faisceaux de ce type, de surcroît monochromes et parallèles, il faut un synchrotron dont l'énergie soit suffisante pour permettre l'emploi des onduleurs modernes, bien supérieurs aux "wigglers" multipôles utilisés dans les premières machines de 3^{ème} génération. Il en résulte la nécessité de disposer de sections droites et d'onduleurs suffisamment longs pour produire les faisceaux voulus.

Or ces dispositifs peuvent perturber la stabilité des faisceaux, sauf si l'énergie de la machine est suffisante. En conséquence, tous calculs faits, l'énergie doit être supérieure à 2,4 GeV, avec une gamme optimale située dans l'intervalle 2,5-2,75 GeV, les chiffres précisément choisis pour SOLEIL.

M. Roger FOURME a indiqué avoir participé aux discussions initiales concernant la spécification de DIAMOND. La gamme 3-3,5 GeV a bien été retenue dès le départ, contrairement à ce qui a pu être dit sur une évolution récente à la hausse de l'énergie de DIAMOND. Depuis cette date, qui correspond d'ailleurs aux premières réflexions sur DIAMOND, la technologie des onduleurs a évolué à grande vitesse vers la mise au point d'onduleurs à faible "gap" sous vide, qui donnent naissance à des faisceaux de grande qualité.

Au reste, la gamme d'énergie de 2,5-3 GeV retenue pour SOLEIL conduit à des brillances de 10^{19} - 10^{20} comparables à celles de l'ESRF et de l'APS, largement suffisantes au point que les faisceaux doivent être atténués et que ce sont plutôt les performances des détecteurs que l'énergie des faisceaux qui constituent la principale limitation des machines. En tout état de cause, M. Roger FOURME a déclaré "engager sa responsabilité" de scientifique en confirmant l'adéquation de la gamme 2,5-3 GeV aux besoins de la cristallographie des protéines.

Par ailleurs, la gamme 2,5-2,6 GeV représente la limite supérieure de ce qui convient pour les travaux réalisés à basse énergie, les énergies plus élevées entraînant des performances dégradées, compte tenu de la puissance thermique des lignes de lumière. Au surplus, la zone des 2

GeV correspond à des durées de vie des faisceaux plus basses et en fait insuffisantes.

En définitive, la zone 2,5-2,75 GeV constitue une zone de compatibilité de la plage de 2,5-3 GeV optimale pour la cristallographie avec celle de 2-2,5 GeV optimale pour les autres disciplines.

Il est apparu également important à M. Roger FOURME de souligner que la biologie structurale n'est pas la seule discipline à utiliser la gamme de longueurs d'onde des rayons X, puisque aussi bien les deux tiers des expériences de physique sur les synchrotrons y recourent également. De fait, la physique a aussi besoin des photons de haute énergie, par exemple pour toutes les expériences se déroulant dans des conditions extrêmes de température et de pression.

M. Georges CHARPAK ayant encore souligné que cette position contredit des affirmations entendues par ailleurs, **M. Vincent MIKOL**, directeur de recherche chez Aventis, a confirmé qu'une énergie de 3 GeV est jugée suffisante par les cristallographes.

M. Roger FOURME a pour sa part rappelé que les cristallographes sont satisfaits par une énergie nominale de 2,5 GeV, parce que l'on sait aujourd'hui utiliser les machines d'énergie moyenne.

Comme l'a indiqué **Mme Marie-Paule LEVEL**, avec un synchrotron de 2,5 GeV, un onduleur moderne ayant un "gap" de 4 mm et une période très courte produit des faisceaux de 20 keV, ce qui correspond aux besoins. Au contraire, avec cette énergie de 2,5 GeV, pour produire des photons de basse énergie, il faut des onduleurs de grande période et des sections droites relativement longues pour obtenir des fortes brillances. En l'occurrence, l'avant-projet détaillé SOLEIL a choisi une énergie de 2,5 GeV et a prévu des sections droites de 7 m et de 14 m, ce qui convient aussi bien pour les photons de basse et haute énergie et permet une bonne durée de vie des faisceaux, ceux-ci étant prévus pour durer 20 heures.

M. Paul MORIN, sur le même thème de la spécification des synchrotrons, s'est attaché à son tour à montrer la diversité des besoins des différentes disciplines.

Ainsi, la biologie met en œuvre non seulement des rayons X pour la résolution de structures mais également des faisceaux de basse énergie pour les études de déclin de fluorescence. De la même façon, en physique, on peut avoir besoin de faisceaux de basse énergie, comme, au contraire, de faisceaux d'une énergie comprise entre 1 et 10 keV

pour les études relatives aux propriétés magnétiques de différents supports.

Au total, le concept de machine polyvalente apparaît bien meilleur que le concept de machine de haute ou basse énergie.

Pour autant, s'est interrogé de nouveau **M. Georges CHARPAK**, si deux machines devaient être construites sur le même site, il serait difficile d'admettre que la solution optimale consiste à construire deux machines identiques. Au contraire, dans cette perspective, sans doute faudrait-il construire un synchrotron de 3 GeV pour la biologie et un autre de 2 GeV pour la physique et certaines méthodes d'analyse utiles à la biologie. On peut à ce sujet imaginer que le Wellcome Trust, au-delà de son financement de DIAMOND, soit intéressé par une prise de participation dans le synchrotron français de 2 GeV.

M. Jochen SCHNEIDER, Directeur du HASYLAB, a, pour sa part, tenu à poser le problème dans des termes différents.

Selon lui, les deux paramètres devant guider le choix de l'énergie sont d'une part la durée de vie des faisceaux qui doit être assez longue pour ne pas compliquer et renchérir l'exploitation, et d'autre part la brillance qui doit atteindre le niveau de 10^{20} de l'unité classiquement utilisée en la matière.

Or les progrès récents des onduleurs sont décisifs et ne sont d'ailleurs pas terminés, de sorte que l'énergie doit être définie de façon que leur utilisation soit possible.

En fait, le paramètre de la durée de vie est décisif : *" la différence entre des faisceaux d'une durée de vie de 18 h et des faisceaux de 2h est la même qu'entre un rêve et un cauchemar "*.

Selon **M. Jochen SCHNEIDER**, les discussions sur les gammes d'énergie sont en réalité oiseuses, une position qu'a approuvé **M. Vincent MIKOL**. Au vrai, ainsi que l'a estimé **M. Jochen SCHNEIDER**, la position exprimée devant le groupe de travail par le Professeur Nils MARTENSSON, le 9 février 2000, emporte définitivement la question : *" si le synchrotron MAX II devait être construit aujourd'hui, compte tenu de l'évolution des besoins et des technologies, l'énergie choisie serait de 2,5 à 3 GeV "*.

Prenant en considération les éléments fournis par le LURE, **M. Gilles COHEN-TANNOUDJI** a souligné combien le choix du seul critère économique pour définir l'énergie du futur synchrotron serait

erroné, d'autant que les économies réalisées avec une machine de basse énergie seraient très faibles.

M. Jochen SCHNEIDER a alors estimé, pour tenter de clore la discussion, qu'une énergie de 2,5 GeV est le minimum à avoir et présente le double avantage d'entraîner des économies et de mettre à disposition des rayons X "mous" de qualité.

M. Jean DAILLANT a précisé à cet égard que le même onduleur qui délivrerait des photons de 4,75 keV sur un anneau de 2 GeV – ce qui est notoirement insuffisant pour un grand nombre d'applications – fournira au contraire des photons de 10 keV sur un anneau de 2,5 GeV, ce qui constitue "un rêve" pour les expérimentateurs.

Dans le débat qui s'est ensuite engagé, **M. Gilles COHEN-TANNOUJJI** a indiqué en substance qu'il ne saurait y avoir deux synchrotrons identiques, tant il est vrai que la diversité des besoins doit se refléter dans la diversité des lignes de lumière et de leur instrumentation, ce qui devrait d'ailleurs ouvrir la voie à une diversification des financements.

M. Michel BESSIERE a appuyé ce point de vue en citant la demande d'accès à des faisceaux de rayons X de 8 keV émanant des chimistes qui souhaitent réaliser des études sur les catalyseurs, la métallurgie, les semi-conducteurs ou les défauts de structure.

Assurément, la biologie n'est pas la seule discipline à avoir besoin de rayons X.

Si l'on traduit ce constat en terme d'énergie de la machine, il est clair qu'il n'existe pas sur le marché d'onduleur permettant de produire de faisceaux de 8 keV sur un synchrotron de 2 GeV.

De même, les études de dynamique en temps réel se multiplient où l'on recrée pour l'expérience les conditions industrielles. Ceci nécessite des faisceaux petits et à forte brillance. Il ne faut pas oublier à cet égard que la chimie représente au total près du tiers des expériences réalisées au LURE, avec des énergies situées entre 5 et 15 keV.

Il s'agit, au final, de ne pas se tromper de question : "une bonne machine est une machine qui fournit des photons de qualité".

La pluridisciplinarité introduite par les synchrotrons a ensuite été détaillée par **M. Roger FOURME**. Les synchrotrons constituent depuis longtemps des lieux de contact essentiels entre les disciplines, analogues aux instituts américains récemment créés sur une base

interdisciplinaire. Au surplus, les synchrotrons permettent l'émergence de nouvelles communautés scientifiques.

La plus mauvaise solution pour un nouveau synchrotron serait sans aucun doute la construction d'une machine dédiée dans un lieu entièrement spécialisé dans une discipline particulière. Au contraire, un outil comme un synchrotron doit être au plus proche des communautés scientifiques, y compris nationales, et contribuer au renforcement de leurs interactions.

Pour le nouveau synchrotron, il faut impérativement conserver le pluralisme de la science qui s'y fera et donner une polyvalence à l'installation. SOLEIL est un synchrotron polyvalent, par définition capable de répondre au "*tout venant*" des recherches. Les questions auxquelles il ne pourra répondre et qui pourront au contraire être résolues sur une installation comme PETRA II, ne représenteront pas plus de 1/1000^{ème} du total.

Pour **M. Jean DAILLANT**, l'optimum à 2,5-2,75 GeV est validé par l'exemple de la source suisse, dont la définition est la plus récente et qui a bien une énergie du même ordre (2,4-2,5 GeV).

Les gestionnaires des sources anciennes de 1,5-1,9 GeV sont au contraire placés devant l'obligation impérieuse de modifier leurs installations.

M. Roger FOURME a pointé à cette occasion la fuite en avant des responsables de ces installations sous-dimensionnées à la base. Des dispositifs de plus en plus complexes et coûteux, comme des "*wigglers*" de nouvelle génération, doivent leur être adjoints, pour des performances somme toute limitées.

Au demeurant, le Canada et l'Australie, qui mettent la dernière main à leurs projets, ont conservé des énergies supérieures ou égales à 2,5 GeV, choisissant à des fins d'économie plutôt la réduction de taille de l'anneau que la baisse de son énergie.

Pour **M. Pierre POINTU**, l'idée de pluridisciplinarité est absolument essentielle. Au reste, tant les représentants du Wellcome Trust que ceux du Central Laboratory for Research Councils (CLRC), rencontrés au Royaume Uni par les Rapporteurs, ont abondé dans ce sens, estimant que "*les gisements de progrès se trouvent moins dans les différentes disciplines scientifiques que dans l'interdisciplinarité*".

Or les très grands instruments sont réellement "*des supports concrets pour des échanges abstraits*". L'on comprend en conséquence l'idée du CLRC de rassembler différents outils sur un même lieu, en particulier en installant le futur DIAMOND sur le site du Rutherford Appleton Laboratory à Didcot, où se trouvent déjà la source de neutrons pulsés ISIS, le laser de puissance Vulcain et bientôt sans doute la source européenne de neutrons produits par spallation (ESS).

M. Jean GALLOT, à cette occasion, a souligné l'importance des notions de spécificité ou de variété et de polyvalence d'un synchrotron, en distinguant la machine des recherches qu'elle permet d'accomplir. Si l'on voulait absolument avoir des biologistes à Oxford, il n'en resterait pas moins indispensable de disposer d'une machine polyvalente en France afin de satisfaire la demande relative à différents domaines de recherche et permettre l'interdisciplinarité.

Un tel équipement est également indispensable pour défendre les positions de la communauté scientifique française dans la compétition internationale, en particulier avec le Royaume Uni. Enfin, il faut faire le choix d'une machine à fort potentiel de développement, puisque ce sont les demandes des 20 prochaines années et non pas des 20 dernières qu'il s'agit de satisfaire.

S'agissant des économies d'échelle, **M. Jean JERPHAGNON** a suggéré que pour en générer de plus importantes, la coopération prévue avec la Grande-Bretagne fût étendue à la Suisse.

Selon **M. Michel BESSIERE**, cette solution est difficilement envisageable, dans la mesure où les Suisses ont non seulement arrêté leur ingénierie de base pour leur synchrotron mais pratiquement achevé sa construction, tandis que ni la France ni le Royaume Uni n'ont pris de décision. Toutefois, si une démarche concertée semble de fait exclue pour les anneaux de stockage, en revanche un travail commun pourrait être engagé sur les lignes de lumière.

Mme Marie-Paule LEVEL a indiqué que les trois laboratoires, français, britannique et suisse, avaient des plans différents au départ. Au surplus, les scientifiques suisses ont reçu le feu vert pour leur projet de synchrotron alors qu'ils ne l'attendaient plus. Une coopération franco-suisse a alors démarré, notamment par la fourniture par le LURE de "*kickers*" et de soufflets. Par ailleurs, le projet SOLEIL a seul rapidement opté pour des cavités accélératrices supra-conductrices qui permettent d'éviter les oscillations multipaquets handicapantes pour la durée de vie et la brillance des faisceaux.

Ce choix s'est avéré judicieux puisqu'il est maintenant envisagé par le Royaume Uni pour Daresbury et par l'ESRF qui l'avaient pourtant rejeté au départ. Par ailleurs, SLS et ELETTRA ont commandé au CEA des cavités supraconductrices harmoniques. Des coopérations existent donc, portant sur des équipements spécifiques et se déroulant souvent à l'avantage de la France grâce à sa maîtrise technique des synchrotrons.

A la demande de **M. Jean JERPHAGNON** poursuivant ses interrogations sur les économies d'échelle, **M. Paul MORIN** a estimé qu'il existe des économies potentielles, à condition de "*changer les manières de faire*". Même si, comme l'a indiqué **Mme Marie-Paule LEVEL**, il est difficile de changer les habitudes, la véritable source d'économies, selon **M. Michel BESSIERE**, se trouve dans la recherche et développement à conduire sur les machines et les lignes de lumière, notamment en valorisant le réseau européen qui existe déjà.

Approuvant l'idée d'économies grâce à une R & D appropriée, **M. Vincent MIKOL** a toutefois souligné que l'objectif de parvenir à des économies d'échelle grâce à des programmes de commandes étalées dans le temps ne devait pas être négligé. Au contraire, un contrat de fourniture d'un nombre important d'onduleurs sur 8 ans devrait, en étant bien négocié, conduire à des remises de 25 à 30 %.

Un débat s'est alors engagé sur la coopération européenne en matière de recherche et développement consacrée aux synchrotrons.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI ayant fait valoir qu'avec l'avant-projet détaillé (APD) SOLEIL, la France dispose d'un atout exportable et valorisable, **M. Roger FOURME** a indiqué que les experts britanniques disposent déjà de l'APD, obtenu sans contrepartie.

M. Jochen SCHNEIDER a confirmé à cet égard que les laboratoires européens de rayonnement synchrotron travaillent ensemble. Le HASYLAB a ainsi coopéré avec l'institut suisse chargé de la construction de la source SLS. Il existe également une coopération formelle entre la France et l'Allemagne sur les cavités supraconductrices. Au reste, la France ne tirera pas "*un sou*" de l'APD SOLEIL puisque tous les chercheurs l'ont déjà entre leurs mains. Selon **M. Michel BESSIERE**, cette coopération est au demeurant institutionnalisée au sein de la Table ronde européenne pour le rayonnement synchrotron.

M. Roger FOURME a poussé plus loin l'analyse en remarquant que l'on se trouve à une période où "*les machines marchent bien*". Si l'on veut

gagner en efficacité sur les synchrotrons, c'est sur les lignes de lumière qu'il faut se concentrer en encourageant les travaux de développement qui s'y rapportent, ainsi en ce qui concerne la cristallographie où l'on pourrait gagner beaucoup en performances avec de meilleurs détecteurs.

En définitive, des progrès plus importants seront générés par des efforts consacrés aux lignes de lumière plutôt qu'aux anneaux de stockage eux-mêmes, compte tenu du niveau déjà atteint par ces derniers. **M. Vincent MIKOL** a déclaré souscrire totalement à cette analyse, tant des progrès lui paraîtraient utiles sur l'instrumentation, l'automatisation des manipulations et les détecteurs des lignes de lumière.

M. Jean GALLOT a remarqué qu'il est important de chiffrer les différentes solutions techniques sur la base d'une évaluation incontestable du nombre de lignes nécessaires aux chercheurs français. A ce sujet, nul doute qu'une bonne planification et une coopération intensive permettraient de diminuer les coûts. Mais, ainsi que l'a clairement dit le directeur du MAXLAB, M. Nils MARTENSSON, son choix aurait été une machine de 2,5 GeV s'il avait disposé des crédits nécessaires, ce qui définit avec précision la machine requise. En tout état de cause, la polyvalence du synchrotron est une exigence prioritaire.

Par ailleurs, **M. Jochen SCHNEIDER** a fait connaître qu'au cours de ses fréquents contacts avec le Royaume Uni, de nombreux chercheurs britanniques lui ont indiqué qu'ils ne comprennent pas la démarche française actuelle.

Pour ceux-ci, puisqu'il existe une coopération franco-britannique dans de nombreux domaines et en particulier pour le rayonnement synchrotron, il est logique de continuer. Mais la raison d'une accélération brutale de la coopération leur semble obscure, la France disposant de ressources propres importantes dans ce domaine.

M. Christian CUVILLIEZ, Député, Rapporteur, a alors communiqué aux participants à la réunion quelques-uns des enseignements de ses rencontres de la veille avec des responsables du Wellcome Trust et du Central Laboratory for Research Councils (CLRC), directement intéressés par le projet DIAMOND.

Pour les représentants du Wellcome Trust rencontrés à Londres le 21 février, et notamment pour le **Professeur Sir Michael RUTTER**, vice-président du " *Board of Governors* " du Wellcome Trust, la participation de la France au projet DIAMOND apparaît seulement- et pas davantage

- comme l'opportunité de diminuer la charge financière du Royaume Uni dans ce projet.

A la question d'une participation croisée dans un synchrotron français, ces représentants ont opposé un refus clair, d'ailleurs teinté d'un certain étonnement qu'une telle question puisse être posée.

Au-delà de l'affichage d'une stratégie sans frontières, la vocation du Wellcome Trust semble bien de soutenir une recherche médicale essentiellement britannique, dans la droite ligne d'un sentiment national fort et, bien entendu, légitime. En l'occurrence, l'adhésion de la France au projet DIAMOND ne trouble pas le Wellcome Trust mais ne l'intéresse pas au-delà de son intérêt financier.

Au surplus, il ressort des autres contacts avec la direction du synchrotron SRS de Daresbury et avec les principaux responsables du CLRC, qu'il n'existe aucune volonté britannique de coopérer avec la France pour la conception de DIAMOND ou l'ingénierie du projet.

En définitive, il semble probable que le Royaume Uni se fixe comme objectif de construire DIAMOND en tirant tout le parti possible non seulement de la contribution financière française mais aussi de l'avant-projet détaillé SOLEIL, voire en recrutant des techniciens français. Au final, en droite ligne de la supériorité britannique traditionnelle dans les négociations, on peut redouter que les chercheurs français, n'utilisent DIAMOND sans qu'aucune contrepartie particulière ne vienne diminuer les coûts d'accès.

M. Pierre POINTU, présent aux côtés du Rapporteur lors de ces différents entretiens, a confirmé que, pour le Wellcome Trust et le CLRC, la candidature de la France est une aubaine dont l'intérêt ne saurait être réduit par un quelconque engagement en retour. Il a estimé par ailleurs qu'avec des subventions de recherche de 4 milliards de francs versées en 1998, le Wellcome Trust peut considérer avec sérénité l'avenir de la participation française à DIAMOND.

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, a précisé par ailleurs que le projet DIAMOND est très en retard par rapport au projet SOLEIL. La mise au point de l'avant-projet détaillé devrait prendre encore de 18 mois à 2 ans, à quoi il faut rajouter au minimum 5 années correspondant à la signature des accords et à la construction proprement dite. Au surplus, selon **M. Jochen SCHNEIDER**, la structure et l'organisation du projet ne sont pas encore définies.

M. Georges CHARPAK ayant estimé que l'intérêt du Royaume Uni eût été de participer plus tôt à SOLEIL, **M. Jochen SCHNEIDER** a estimé qu'une coopération internationale et en particulier européenne n'est nécessaire que là où l'on en a besoin, faute de ressources nationales suffisantes. Pour les Britanniques qui disposent déjà de la source SRS à Daresbury, opter pour une participation à SOLEIL eût été difficile et le serait toujours, d'ailleurs, alors qu'il leur suffit, plutôt que d'aller en France, d'attendre quelques années pour avoir accès à des lignes nationales.

M. Jean DAILLANT a précisé que le synchrotron suisse SLS est sur le point de démarrer et que la France y étudie les conditions d'une utilisation permanente de deux lignes de lumière.

S'agissant du synchrotron SRS de Daresbury, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a noté que la coopération actuellement envisagée trouve son origine au niveau politique et ne semble pas au contraire le prolongement de contacts étroits entre les deux communautés scientifiques.

S'agissant de la coopération internationale, **M. Guy OURISSON** a exposé que l'intérêt de l'ensemble de la communauté scientifique européenne eût été de disposer d'un calendrier sur 20 ans pour les investissements dans les synchrotrons. Il s'est demandé à cet égard si un délai de 5 ans pour une décision serait dommageable ou, au contraire, utile.

M. Michel BESSIERE a insisté sur le fait que la construction d'un synchrotron national doit démarrer immédiatement, pour remobiliser les concepteurs et éviter le dépôt de bilan des entreprises de haute technologie dont l'activité est liée à celle des synchrotrons. Au demeurant, s'il existe, ainsi que l'a souligné **M. Paul MORIN**, un optimum pour l'énergie de l'anneau de stockage, ce que **M. Jochen SCHNEIDER** a approuvé une nouvelle fois, de nombreux progrès restent à faire sur l'instrumentation, qui exigent un travail continu et donc une mise en chantier rapide d'un nouveau synchrotron.

M. Jochen SCHNEIDER a, pour sa part, estimé que la France doit s'engager rapidement dans un projet valable pour les 20 ans à venir, faute de quoi elle sera absente des réseaux mondiaux qui travaillent à faire progresser des technologies fondamentales pour l'analyse de la matière et du vivant, notamment parce que ses équipes seront démantelées et ses spécialistes attirés par d'autres pays, et ceci beaucoup plus rapidement qu'on ne le pense.

A cet égard, **M. Jean GALLOT** a rappelé que l'abandon par l'Italie d'une source nationale de neutrons a été suivi d'un affaiblissement rapide et durable de son école de neutronique, démontrant qu'en l'absence d'un outil d'expérimentation national, il se produit une disparition progressive de la communauté de spécialistes.

Or aujourd'hui, chaque pays d'Europe " *se bat pour lui-même* " dans le domaine des très grands instruments, comme l'ont d'ailleurs, observé les Rapporteurs au Royaume Uni. Au vrai, " *personne ne comprend la décision française* ". S'agirait-il d'un manque de pédagogie ? Alors des explications plus approfondies permettraient d'en comprendre les raisons. Or, en réalité, c'est tout le contraire qui se produit : " *plus on approfondit la question et 'plus on ne comprend pas'* ", pourrait-on dire pour résumer la situation. En définitive, la décision ne paraît pas être dictée par des raisons scientifiques. Mais, précisément, comment dans le domaine des très grands instruments ne pas prendre en compte des raisons scientifiques ?

Pour terminer ces échanges de vues, **M. Jochen SCHNEIDER** a estimé qu'il faut aussi faire preuve de réalisme et examiner avec précision les paramètres économiques. En tout état de cause, dans le cas d'un synchrotron, l'investissement pèse moins lourd que l'exploitation. Or d'une part, des crédits d'investissement alloués à un projet particulier et ensuite annulés restent rarement alloués à la recherche scientifique, et, d'autre part, les dépenses de fonctionnement sont notablement alourdies par l'exploitation d'un très grand instrument situé à l'étranger.

Après avoir souligné qu'il s'agit aussi pour la France de s'inspirer de l'exemple britannique de constitution au plan national d'une masse critique de grands instruments, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a remercié les représentants du LURE pour leurs contributions écrites et leurs présentations orales, toutes deux très précieuses pour l'analyse du dossier.

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, a ensuite donné la parole à M. Philippe LAREDO, chercheur au Centre de sociologie de l'innovation de l'Ecole nationale supérieure des Mines de Paris, pour une communication consacrée à " *une analyse internationale des interactions entre les très grands instruments et la recherche publique et privée* ".

*

M. Philippe LAREDO a, dans un premier temps, mis l'accent sur les difficultés créées par les insuffisances de la comptabilité publique pour

le traitement des investissements quels qu'ils soient, et en particulier dans le domaine des très grands instruments.

Au demeurant, les crédits annuels en jeu pour le synchrotron représentent un montant limité qu'on peut par exemple mettre en rapport avec les investissements pratiqués chaque année par le CEA.

Tout se passe comme si, du fait de techniques comptables inadaptées, l'administration et les grands organismes créaient eux-mêmes des obstacles à leur propre action.

En effet, dans les cadres comptables actuels, aucun amortissement n'est possible. Quand arrive le moment de remplacer le grand instrument, il est alors obligatoire de "*faire de la politique*". Ainsi, dans le cas du LURE, s'il avait été possible d'amortir l'investissement de départ, le CNRS et le CEA auraient disposé de montants financiers accumulés tout au long de l'exploitation de l'équipement et auraient donc pu décider par eux-mêmes de ce qu'il convenait de faire pour son remplacement.

Pourtant, dans le cadre actuel de la comptabilité publique, un système de constitution de réserves financières a été mis en place pour les navires océanographiques à partir de 1984-1985, permettant ainsi de les renouveler sans heurt.

Sans attendre une hypothétique réforme du système de comptabilité publique, des solutions existent donc qui peuvent assurer une continuité dans les grands équipements, sans toujours faire remonter la décision à un niveau politique qui ne devrait pas nécessairement avoir à en connaître.

L'absence d'amortissement ou de constitution de réserves a un autre effet très important qui concerne la tarification de l'usage des équipements. "*Quand on n'amortit pas un équipement, on ne sait calculer ses tarifs d'utilisation qu'au coût marginal*". D'où des tarifs sans rapport avec les réalités économiques et financières de l'investissement et l'absence de repère pour fixer des niveaux de redevances qui reflètent réellement ses coûts de fonctionnement et d'accès.

M. Philippe LAREDO a en deuxième lieu estimé que pour des décisions dont l'impact scientifique et économique dépasse largement le cadre disciplinaire promoteur du projet, il est souhaitable que la décision soit préparée à plusieurs niveaux et au crible de différents critères. Si chaque organisme disposait de ses propres réserves d'investissement, cela favoriserait d'une part l'expression de stratégies à long terme. Cela

permettrait d'autre part une concertation entre grands organismes qui permettrait de mieux mesurer l'intérêt inter-organismes et inter-disciplinaire d'un équipement. L'absence d'amortissement fait immédiatement remonter la préparation de la décision au niveau de la tutelle.

On est donc face à un processus de décision qui ne distingue pas clairement responsabilités scientifiques et techniques et responsabilités politiques. Cela limite d'autant la capacité des promoteurs de projet à faire vivre, comme d'autres innovateurs, leurs projets et notamment à agréer sur lui des acteurs institutionnels différents.

S'ajoutant à l'absence d'amortissement, un autre défaut de méthode hypothèque la validité du processus de décision. Les activités de recherche ne sont pas considérées comme une activité économique, ce qui empêche de mettre en face de la colonne dépenses, les recettes correspondant aux retombées économiques et fiscales ainsi que les effets d'entraînement sur l'activité économique et scientifique.

En fait, les collectivités locales sont au plan des méthodes de choix d'investissement et au plan du financement de ceux-ci, beaucoup plus avancées que l'Etat. Celles-ci considèrent en effet qu'un investissement dans la recherche scientifique génère des contreparties qu'il s'agit logiquement d'agréer pour avoir une appréciation correcte de son intérêt. On peut citer à cet égard les retombées sur les PME locales de haute technologie.

Un autre élément est souligné par M. Philippe LAREDO. Il s'agit de la cohérence d'ensemble du système d'innovation. Peut-on à la fois pousser à la création de sociétés de haute technologie dans le domaine des sciences du vivant et se désintéresser de leurs conditions d'accès à un instrument de caractérisation qui peut s'avérer central ? Auront-elles aussi facilement accès aux instruments éloignés ? On peut voir au Japon une multiplication d'instruments, y compris promus par des régions.

Parmi les autres traits caractéristiques de la question de très grands instruments, il faut également citer, selon M. Philippe LAREDO, le rôle croissant des fondations de financement de la recherche médicale et des associations de familles de malades.

A cet égard, il lui apparaît établi que le Wellcome Trust n'a " rien à voir " avec la société Glaxo Wellcome. On peut certes se demander pourquoi une fondation choisit d'investir dans un domaine ou pour tel ou tel

projet. Au vrai, les fondations semblent constituer les portes-parole et les acteurs d'une politique de la santé souhaitée par la société.

Enfin, les méthodes globales de la gestion publique doivent être réexaminées à l'occasion d'une réflexion sur la question d'un nouveau synchrotron. La responsabilité de déterminer les investissements nécessaires pour la recherche ne pourrait-elle pas revenir aux chercheurs et aux organismes de recherche ?

On peut, sur ce thème, imaginer que le ministère n'apporte qu'une contribution marginale au financement des très grands instruments, manifestant sa préférence par son soutien à tel ou tel projet mais ne pouvant bloquer les autres qui seraient considérés comme vitaux par les acteurs de la recherche.

Dans ce cadre, les acteurs de la recherche pourraient se voir confier le soin d'opérer leurs propres montages, une méthode parfaitement justifiée dans le cadre d'une programmation pluriannuelle.

Mais, ces approches supposent une capacité d'agir que seule permet la disponibilité de ressources financières. D'où il ressort que l'impossibilité de pratiquer des amortissements et sa conséquence, à savoir des tarifications aberrantes en l'absence de repères économiques valables, sont bien au cœur des difficultés rencontrées par les très grands instruments dans notre pays.

Un débat s'est ensuite amorcé sur la place du Wellcome Trust dans les structures économiques et scientifiques britanniques.

M. Christian CUVILLIEZ, Député, Rapporteur, a indiqué que la participation de celui-ci dans DIAMOND, devrait s'élever, selon son vice-président, le Professeur Sir Michael Rutter, à 110 millions de livres, soit 16 à 17 % du total, répartis entre 70 millions de livres de participation à la construction de la machine et 40 millions de livres de participation aux frais de fonctionnement.

M. Georges CHARPAK a jugé que le Wellcome Trust ne possède aucun lien avec les industriels, suivi en cela par **M. Vincent MIKOL** qui a souligné son statut de " *Charity Trust* " et sa direction par un " *Board* " constitué de personnalités indépendantes.

M. Roger FOURME a estimé, quant à lui, que, même si la nature réelle du trust n'est pas fondamentale pour la question d'un synchrotron implanté sur le sol français, il ne faut pas tomber " *dans un excès de naïveté* ". La recherche contemporaine s'effectue en réseaux couvrant

tous les pays. L'accès à des informations cruciales sur les politiques de santé et les politiques de recherche des pays et des laboratoires pharmaceutiques représente un atout capital.

Une organisation telle que le Wellcome Trust fournit à ses dirigeants des postes d'observation privilégiés où les "*bonnes idées*" peuvent être saisies, qui "*percoleront*" naturellement dans un ensemble de structures publiques ou privées. Il s'agit là certes d'un système subtil adapté aux spécificités britanniques mais posant un problème d'équilibre politique aux autorités françaises.

M. Vincent MIKOL, en désaccord avec cette approche, a estimé que les industriels mettent au premier rang de leurs priorités le critère du retour sur investissement et sont particulièrement soucieux du droit à l'exclusivité pour les découvertes qu'ils ont financées, ce qui est à l'opposé de la pratique du Wellcome Trust de financer des recherches publiées.

M. Pierre PAPON, qui a participé aux visites des Rapporteurs au Royaume Uni, a rendu compte du souci, au demeurant légitime, exprimé par l'ensemble de ses interlocuteurs de défendre les intérêts britanniques par une préférence nationale. **M. Roger FOURME**, qui a souhaité voir réaliser des études approfondies sur les fondations, a souligné que le système industriel prend en compte de nos jours la recherche au niveau le plus élevé.

Pour **M. Philippe LAREDO**, le financement à hauteur d'un milliard de dollars par Bill Gates de recherches sur les maladies orphelines n'a pas d'impact direct sur la diffusion de Windows et les autres produits de Microsoft. L'histoire du Wellcome Trust montre qu'il a été créé en toute indépendance. Au reste, sa masse critique en terme de revenus annuels le met à égalité avec le budget de l'agence britannique de financement de la recherche publique, ce qui lui permet aussi d'être indépendant de l'industrie. Le programme britannique Forsight en est un exemple. La France, quant à elle, "*fait la même chose localement mais pas globalement*", avec par exemple dans le cadre du programme Bioavenir, une subvention de 400 millions de francs accordée à Rhône Poulenc.

M. Jean GALLOT a insisté toutefois sur le poids que le Wellcome Trust a dans la conduite du projet DIAMOND, alors que sa participation ne dépasse pas 17 %. Ainsi, le choix d'un autre site que celui d'Oxford aurait été présenté comme un "*casus belli*" par ce "*charity trust*". On peut certes avancer une analyse sur l'indépendance du Wellcome Trust mais force est de reconnaître son poids potentiel dans les décisions.

M. Philippe LAREDO a alors rappelé que le débat sur les très grands instruments dure depuis 15 ans dans notre pays et a répété que si l'on amortissait ces équipements, il n'y aurait plus de débat, avec de surcroît une clarification des relations public-privé grâce à des tarifications ayant une base économique sérieuse.

M. Gilles COHEN-TANNOUDI a alors souligné que certaines lignes de lumière sur différents synchrotrons sont financées et exploitées en commun par plusieurs universités. Il a alors proposé que l'on fasse une distinction plus claire entre les infrastructures de base des synchrotrons, c'est-à-dire l'anneau de stockage, et les lignes de lumière proprement dites qui représentent en réalité des investissements mi-lourds finançables sur des fonds d'intervention. Il a appelé enfin à multiplier les partenariats entre organismes de recherche.

Selon **M. Philippe LAREDO**, pour sortir du blocage actuel sur la question du synchrotron, "*il faut que chacun donne une partie de la solution*". La communauté scientifique pourrait accepter la délocalisation. Le ministère pourrait apporter une contribution supérieure au financement initialement prévu pour de nouvelles ressources en rayonnement synchrotron. Mais, en définitive, il s'agit de mettre au point un montage recourant à l'emprunt et à l'amortissement. L'exemple de l'ESRF devrait être médité à cet égard.

Après avoir remercié M. Philippe LAREDO pour sa contribution au débat, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a invité à M. Paul CLAVIN à prendre la parole.

*

M. Paul CLAVIN, en préambule à son exposé, a retracé la genèse des propos qui lui ont été attribués. Ayant été invité par le ministre de la recherche à lui rendre un "*rapport confidentiel*", et des commentaires sur ce document ayant été diffusés sur Internet par M. Yves PETROFF, M. Paul CLAVIN a été autorisé par le ministre à répondre par le même canal à ce dernier. Ce sont les considérations correspondantes qui constitueront la trame de son exposé.

En tant que responsable de la physique et des sciences de l'ingénieur au ministère de la recherche, M. Paul CLAVIN a été saisi par le ministre d'une étude sur la possibilité de mettre en place une solution européenne pour le rayonnement synchrotron.

Ayant précisé qu'il n'est pas un expert du domaine, M. Paul CLAVIN a toutefois conclu rapidement au cours de son étude que le rayonnement

synchrotron est amené à poursuivre son expansion, avec toutefois un glissement des utilisations depuis les basses énergies vers les hautes énergies. Une explosion des besoins est même prévue par les Anglo-saxons pour la diffraction réalisée avec des faisceaux d'une énergie supérieure à 7 keV.

Selon les responsables britanniques et américains, les besoins en rayons X - X "durs" dans les 20 ans à venir devraient croître jusqu'à occuper 80 % de l'activité totale en rayonnement synchrotron, et ceci au détriment de la gamme UV - X "mous", l'essentiel du glissement devant être le fait des utilisations pour la biologie structurale. Au reste, selon un rapport publié aux Etats-Unis, les utilisations pour la biologie structurale sont déjà passées de quelques pour-cent en 1990 à environ 30 % en 1997. Cette expansion va se poursuivre.

A cet égard, si aucune machine supplémentaire n'était construite en Europe, le manque déjà constaté en Europe dans la gamme des énergies de 7 à 10 keV s'approfondirait, les demandes d'énergies supérieures à 10 keV étant quant à elles satisfaites par l'ESRF de Grenoble.

L'Allemagne et d'autres pays se sont dotés pour leur part de machines d'énergie inférieures à 2,5 GeV. Avec les technologies récentes des "wigglers", on peut utiliser des machines de basse énergie pour produire des rayons X, ainsi que le montre l'exemple de l'ALS dont l'énergie ne dépasse pas 1,9 GeV.

Au demeurant en Europe, la situation est différente de ce que l'on entend souvent. Au début de son étude, on avait rapporté à M. Paul CLAVIN que les machines européennes étaient saturées et qu'en conséquence il n'y avait pas de place pour les utilisateurs français. Or des contacts noués avec la Suisse, l'Allemagne et l'Italie, il est résulté que tous ces pays pouvaient proposer des solutions à la France.

A quel niveau se sont effectués ces entretiens ? Au niveau des directeurs de la recherche et de leurs staffs de spécialistes, c'est-à-dire au niveau des responsables politiques et des responsables des machines. Ces contacts ont été positifs, en ce sens que des discussions ont pu s'engager, la possibilité d'utiliser des machines existant concrètement.

Les interlocuteurs allemands de M. Paul CLAVIN ont effectivement chiffré les opportunités existantes.

Quant aux responsables britanniques, ils ont fait preuve d'une "*grande ouverture*" et d'une "*volonté de collaborer avec la France*". La première raison en est que le groupe technique constitué pour réaliser l'avant-projet détaillé SOLEIL leur est apparu comme de grande qualité et que la France dispose de compétences de premier niveau dans ce domaine.

La deuxième raison est que l'objectif des Britanniques, rejoignant ceux d'autres pays, est de disposer tout de suite de faisceaux supplémentaires pour la biologie. Le Wellcome Trust, dont "*l'argent vient des industriels de la pharmacie*" ayant la même volonté, le Royaume Uni veut au total satisfaire au premier chef les besoins de la biologie avec DIAMOND.

M. Paul CLAVIN a noté, à cet égard, une différence entre DIAMOND et le projet SOLEIL dans sa version initiale, encore que ce dernier ait évolué ensuite.

Après avoir quitté le ministère de la recherche le 1^{er} janvier 1999, M. Paul CLAVIN a poursuivi les discussions avec les différents pays européens en tant que "*représentant et conseiller*" du ministre. Considérant les propositions britanniques intéressantes, M. Paul CLAVIN a estimé que ni l'intérêt national ni l'intérêt européen ne commandaient de construire SOLEIL en parallèle à DIAMOND et qu'il convenait au contraire de "*décaler dans le temps la construction de la deuxième machine*", en particulier parce que "*les choses évoluent très vite*", ainsi que le montre l'exemple du projet canadien qui a subi une évolution radicale portant son énergie d'un niveau inférieur à 2 GeV en 1995 à 2,5 GeV aujourd'hui.

M. Gilles COHEN-TANNOUDI ayant précisé que le niveau d'énergie finalement retenu au Canada atteint 3 GeV, **M. Paul CLAVIN** a poursuivi en indiquant que le niveau de DIAMOND est, quant à lui, passé de 3 à 3,2 GeV. Toutefois, plus le niveau d'énergie monte, et plus le coût s'élève.

Dans ses premières versions, "*SOLEIL n'était pas adapté aux besoins en augmentation*" au contraire de DIAMOND, dimensionné d'entrée pour répondre à la demande des biologistes. Mais pour faire son travail de conseiller, M. Paul CLAVIN a jugé nécessaire d'avoir des données chiffrées et celles communiquées par le Royaume Uni sont apparues intéressantes. C'est ainsi que le Royaume Uni, à la pointe des technologies mises en œuvre en biologie structurale, estime que les besoins quantitatifs en temps de faisceau de cette discipline vont s'accroître très rapidement.

Au reste, il existe un intérêt scientifique à coopérer avec le Royaume Uni et, au-delà, à favoriser la constitution d'une Europe scientifique.

M. Paul CLAVIN a rapporté qu'en conséquence il a conseillé au ministre de la recherche de travailler avec le Royaume Uni pour la construction d'une nouvelle machine franco-britannique, qui ne serait pas située sur le sol français puisque la France accueille déjà sur son sol l'ESRF. Il ne serait toutefois pas exclu que, dans un deuxième temps, une autre machine soit construite ailleurs en Europe, en temps utile. En effet, *" il n'est pas indispensable de mettre tous les œufs dans le même panier "*.

Le contexte de cette préconisation est qu'elle doit se faire sans entraîner d'augmentation de la part du rayonnement synchrotron dans le budget civil de la recherche et développement (BCRD). Dans ce cadre, l'on doit pouvoir satisfaire les besoins français avec une coopération avec les Britanniques ainsi qu'avec la Suisse, l'Allemagne et l'Italie.

Au final, le schéma proposé représente les $\frac{3}{4}$ du potentiel de SOLEIL pour les sections droites sans compter les lignes sur aimant de courbure. Or en terme de rayonnement synchrotron, l'effort de la France est supérieur à celui des autres pays. L'Allemagne dont la politique n'est d'ailleurs peut-être pas optimale dans ce domaine, doit être mise à part. Avec le nouveau schéma, la part du rayonnement synchrotron dans le BCRD resterait au niveau de celle observée dans d'autres pays.

Faisant état de sa participation au Conseil scientifique du projet SOLEIL, **M. Vincent MIKOL** a objecté que, dès après les premières études de 1994-1995, l'énergie de ce synchrotron a été portée dès 1996 à 2,5 GeV et que le projet SOLEIL, avec 8 lignes pour la biologie, correspond depuis cette date à ce qu'attendent les biologistes. Sur le sujet des comparaisons des coûts, M. Vincent MIKOL a insisté sur la nécessité de bien étudier l'influence, sans doute importante, de l'expatriation et des niveaux de vie au Royaume Uni, en Allemagne, en Suisse et en Italie, sur les salaires et les primes à verser aux chercheurs français détachés.

Pour **M. Paul CLAVIN**, l'impact financier des frais de mission n'a pas été chiffré en détail.

Mais, en tout état de cause, la construction de SOLEIL aurait pour effet de majorer de 40 % sur 20 ans la part du rayonnement synchrotron dans le BCRD, qui est approximativement de 250 millions de francs par an. Au demeurant, s'il apparaissait impossible de mettre en place une coopération européenne, il faudrait bien entendu construire SOLEIL.

M. Georges CHARPAK s'étant fait l'écho des doutes entendus de différents côtés sur la possibilité réelle d'accéder à des lignes complémentaires sur des machines européennes, **M. Paul CLAVIN** a souligné que l'Allemagne, qui au demeurant investit "*tous azimuts*" dans les synchrotrons pour des raisons qui ne sont pas toutes scientifiques, a fourni des précisions sur les conditions financières d'utilisation de certaines de ses lignes, en particulier à BESSY II et que la Suisse et l'Italie ont fait de même. Il est certain qu'il faut rajouter à ces chiffres les "*dépenses de mission*".

Pour **M. Jochen SCHNEIDER**, il existe des déterminants régionaux forts dans la politique scientifique allemande. La construction de la source ANKA en est une illustration. Mais, en tout état de cause, il n'est pas vrai que l'on soit encore aujourd'hui dans une dynamique de développement des machines de 3^{ème} génération.

Au contraire, il existe une convergence de la communauté scientifique internationale sur l'énergie de 2,5 GeV considérée comme une énergie optimale pour avoir une brillance de haut niveau, des faisceaux d'une durée de vie suffisante, une émittance suffisamment réduite et qui permette également de mettre en application les nouvelles idées sur les onduleurs.

L'exemple de BESSY II à Berlin est éclairant à cet égard. Ce synchrotron de 1,7 GeV initialement voit son énergie rehaussée à 2,1 GeV mais est condamnée à utiliser des "*wigglers*" qui ne constituent pas une source optimale. Les responsables préféreraient de beaucoup disposer d'une énergie de 2,5 GeV pour implanter des onduleurs de dernière génération. Aujourd'hui, il est clair que les responsables allemands ne construiraient pas un synchrotron de faible énergie, même de 1,9 GeV.

S'agissant de l'accueil des autres pays contactés par la France, il est vrai qu'il soit ouvert dans la mesure où la France apporte des idées compétitives pour l'utilisation des lignes de lumière, bien que les projets allemands suffisent à occuper toutes les installations disponibles.

M. Paul CLAVIN a alors indiqué que la France ne demande à être un simple client. Ainsi, il s'agit d'obtenir une exclusivité française sur des sections droites, même si dans certains cas il serait nécessaire de rétrocéder 30 % du temps pour des utilisations publiques. La volonté de la France est bien de participer au développement technologique et de collaborer avec des machines de plus haute énergie, mais dans le cadre européen.

M. Jochen SCHNEIDER a confirmé l'offre par Berlin de deux sections droites à BESSY II, conditionnée toutefois, comme l'a indiqué **M. Paul CLAVIN**, par des dates limites.

Mais, selon **M. Jochen SCHNEIDER**, la solution SOLEIL apportera la flexibilité nécessaire pour l'avenir. Les applications des rayons X représenteront-elles 80 % du total, comme certains le disent ? En réalité, la cristallographie des protéines dont on escompte la croissance la plus rapide, fera l'objet d'une automatisation qui pourrait accroître d'un facteur 2 le nombre de structures obtenus par unité de temps.

Par ailleurs, d'autres questions devront être résolues dans les 20 prochaines années en biologie, de sorte que les applications du rayonnement synchrotron ne se limitent pas à celles des rayons X.

Au reste, il existe en France des compétences de premier rang mondial pour la spectroscopie et la résolution temporelle des structures qu'il lui faut absolument conserver.

M. Pierre POINTU a demandé ensuite des précisions à M. Paul CLAVIN en premier lieu sur le poids financier de l'anneau de stockage par rapport aux lignes de lumière, en deuxième lieu sur ses déclarations relatives au fait que la France aurait "*raté les trains suisse et allemand*" en matière d'opportunités de coopération et en troisième lieu sur le bien-fondé de l'idée de suivre le "*train anglais*" alors qu'il existe un actif important en France en matière de rayonnement synchrotron.

M. Paul CLAVIN a confirmé ses déclarations sur les opportunités manquées dans le passé.

Il a souligné le fait qu'aucune coopération internationale n'était prévue par l'APD SOLEIL en 1998 et que celui-ci ne bénéficiait d'aucun soutien concret de l'industrie. S'agissant de l'ESRF, la France "*a payé plus*" que ses partenaires comme c'était normal puisque la machine a été construite sur le sol français.

Certes le Royaume Uni a déclaré ses intentions de construire un synchrotron plus tardivement que la France mais il en fait désormais une priorité irrévocable.

Dans ces conditions, est-il réhhibitoire de devoir traverser le Channel ? M. Paul CLAVIN a indiqué qu'il envisagea de faire aux Britanniques la proposition que la future machine franco-britannique fût construite sur le sol français. Mais cette proposition lui est apparue irréaliste dans la mesure où le Royaume Uni avait déjà pris sa décision.

Le conseil de M. Paul CLAVIN au ministre de la recherche a donc été de continuer la négociation avec le Royaume Uni si l'intérêt national se trouvait là. Or l'idée de base de la participation française à DIAMOND complétée par des locations de lignes en Europe est que l'on pourra parvenir à une économie de 2 milliards de francs sur 20 ans tout en bénéficiant de $\frac{3}{4}$ du potentiel de SOLEIL.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI, à ce moment de la discussion a demandé si l'une des critiques faites à SOLEIL n'était pas une énergie insuffisante.

M. Paul CLAVIN a indiqué avoir effectivement posé la question à M. Yves FARGE qui invoqua alors la question de prix et indiqua qu'avec un budget sans contrainte, une énergie plus élevée aurait été choisie. Toutefois, les technologies des synchrotrons évoluant à grande vitesse, il est possible d'obtenir des performances intéressantes pour une énergie de 2,5 GeV. Au reste, l'idée d'une machine plus petite et plus spécialisée construite en France ne figure pas dans son rapport.

Une discussion s'est ensuite engagée sur l'avenir de la communauté française du rayonnement synchrotron. Pour **M. Jochen SCHNEIDER**, si on disperse cette communauté en Europe, son potentiel d'innovation sera modifié. Or il s'agit d'un domaine dynamique. A l'heure actuelle, la France est à la limite. Sans machine, elle perdra sa compétence. Si la décision de construire SOLEIL était prise dans 5 ans, alors les équipes nécessaires ne seraient plus disponibles car leurs membres seraient partis utiliser leurs compétences ailleurs en Europe.

M. Paul CLAVIN a alors indiqué que, s'il avait partagé ce point de vue, les conclusions de son rapport n'auraient pas été celles qu'il a proposées. Au fond des choses, M. Paul CLAVIN est convaincu qu'il est indispensable de conduire la politique des très grands instruments au plan européen. L'exemple du CERN montre qu'une coopération européenne n'a pas été dommageable pour l'IN2P3.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a souligné à cet égard, que s'il existe environ 60 synchrotrons dans le monde, un seul est international et qu'il s'agit de l'ESRF. Au vrai, en matière de rayonnement synchrotron, il est plus commode de construire et d'exploiter une machine nationale.

M. Georges CHARPAK a estimé qu'on peut retourner cet argument dans la mesure où l'on admet aujourd'hui que la décision de construire Saturne à l'échelon national a été une erreur.

Selon **M. Paul CLAVIN**, il est prouvé que "*l'on a raté une coopération européenne*". Des propositions ont été faites à la France, auxquelles la communauté nationale n'a pas répondu. Dans un même ordre d'idée mais dans d'autres temps, selon **M. Georges CHARPAK**, le CERN a eu du mal à être accepté, notamment par Orsay, qui s'y était opposé.

M. Guy OURISSON, à ce moment, a estimé que l'orateur avait tenu des propos contradictoires sur la question de l'évolution technologique des synchrotrons. D'un côté, il a été dit que l'on est sur un plateau pour l'évolution de cet instrument. D'un autre, il a été avancé qu'il serait avantageux de décaler la décision dans le temps pour intégrer les derniers perfectionnements.

M. Jochen SCHNEIDER a alors fait le point sur cette question. S'agissant de la technologie des anneaux de stockage, même s'il existe peut-être encore un facteur 10 ou 100 à gagner, "*on est à peu près à l'optimum*". En revanche, des progrès restent à faire, très importants ceux-là, sur les lignes de lumière. Par ailleurs, et sur un plan différent mais complémentaire, des idées nouvelles existent qui ne concernent pas les anneaux.

Ainsi au laboratoire DESY de Hambourg, des travaux sont menés sur les accélérateurs linéaires dans la perspective de la mise au point de lasers à électrons libres. Certes, plusieurs étapes seront nécessaires pour aller vers des longueurs d'onde courtes correspondant aux rayons X. Mais une expérience récente a démontré la validité du concept pour une longueur d'onde de 109 nm. Bien sûr, des délais importants seront nécessaires pour atteindre la fiabilité de tels dispositifs expérimentaux mais il s'agit là du développement à terme de nouveaux moyens d'analyse. Dans l'intervalle, il faut bien évidemment des anneaux de stockage pour produire des rayons X.

M. Philippe LAREDO a alors remarqué qu'environ 250 millions de francs par an provenant du BCRD sont consacrés au rayonnement synchrotron. Cette dépense serait plus élevée de 40 % si l'on amortissait les machines, ce qui démontre a contrario qu'avec ce mécanisme, le renouvellement du LURE n'aurait pas posé de problème de financement.

De fait, pour **M. Paul CLAVIN**, le BCRD n'étant pas extensible, il est nécessaire de faire des choix et d'établir des priorités.

S'agissant de l'avenir de la communauté française des concepteurs de synchrotrons dont la qualité est reconnue, **M. Philippe LAREDO** a souligné que la vie de cette communauté dépend de ses travaux de

conception et d'exploitation du LURE et qu'après s'être encore "*affutée*" lors de la création de l'ESRF et de l'APD SOLEIL, elle doit avoir de nouveaux objectifs.

Selon **M. Paul CLAVIN**, la communauté française devrait participer de manière active à la conception de la machine franco-britannique, comme le demande la partie anglaise.

A la demande de **M. Philippe LAREDO**, il a par ailleurs été précisé par **M. Paul CLAVIN** qu'à son avis, le chiffre de 350 millions de francs présenté comme le montant de la participation française au projet DIAMOND ne comprend pas les salaires du personnel français et ne représente donc que l'investissement en capital sur le sol britannique pour construire la machine et les laboratoires français.

M. Jochen SCHNEIDER a rendu compte de ses contacts avec de nombreux chercheurs britanniques dont aucun ne comprend la position française.

A la demande de **M. Philippe LAREDO** portant sur l'hypothèse de deux machines d'énergies différentes et sur la localisation de la machine française, M. Paul CLAVIN a indiqué que "*son rapport comportait d'autres études*".

Après avoir remercié M. Paul CLAVIN pour sa contribution à l'information du groupe de travail, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, Rapporteur** a accueilli M. Jean-Claude LEHMANN, Directeur de la recherche du groupe Saint Gobain.

*

M. Jean-Claude LEHMANN a commencé par rappeler ses anciennes fonctions de directeur scientifique du CNRS au moment où la décision de construire l'ESRF a été prise, sa participation au Conseil des grands instruments et sa présidence du conseil d'administration de l'Institut Lauë-Langevin de Grenoble.

Ce sont ces différentes fonctions, sa spécialité de physique atomique et moléculaire et ses responsabilités de directeur de la recherche du groupe Saint Gobain depuis 12 ans auxquelles s'ajoutent sa vice-présidence du conseil supérieur de la recherche et de la technologie et son appartenance au Conseil national de la science, qui sont à la base de son appréciation de la situation française dans le domaine du rayonnement synchrotron.

Pour M. Jean-Claude LEHMANN, la situation actuelle est trop émotionnelle, alors que, pour prendre des décisions dans ces domaines, il faut disposer d'éléments les plus objectifs possibles. Ceci est d'autant plus vrai qu'une controverse malsaine s'est développée entre les lobbies de la physique et de la biologie autour de la question des grands instruments.

Au reste, l'absence du Conseil des très grands instruments se fait cruellement sentir, en laissant le champ libre aux approches émotives. En tout état de cause, il serait nécessaire de créer de nouvelles structures, par exemple un comité des très grands équipements européens qui traiterait en permanence de cette question.

S'agissant du point de vue de l'industrie sur l'importance du rayonnement synchrotron, on retrouve un paradoxe français. Alors que les installations comme le LURE et l'ESRF et les spécialistes français du domaine sont excellents, l'industrie française ne tire pas suffisamment parti des avantages que ces deux atouts pourraient lui apporter, contrairement à ce que l'on observe dans d'autres pays.

Mais ce paradoxe français va encore plus loin dans d'autres domaines, puisque la France qui, dans les rangs de son industrie, compte pourtant avec Saint Gobain le premier verrier mondial, n'a pas de centre de recherche sur le verre sur son sol. En tout état de cause, *" il faut que la France garde un apport intellectuel à offrir aux industriels "*.

Les industriels sont toutefois conscients que le rayonnement synchrotron devient un outil parmi d'autres pour l'étude des matériaux, le traitement de surface, la pharmacie où il est d'une grande utilité pour l'analyse des structures, les analyses dynamiques et l'imagerie. L'industrie est consciente du fait qu'il lui faut des outils de plus en plus performants et qu'il lui faut apprendre à les utiliser.

Au reste, le monde académique n'a pris que tardivement conscience de la nécessité de collaborer avec l'industrie. Quant aux industriels, ils n'ont pas l'habitude de travailler sur les très grands instruments et ont tendance à les considérer comme des outils au service de la recherche publique, principalement.

Comment améliorer cette situation ?

L'industrie française ne s'impliquera que difficilement dans des investissements relatifs à des grands instruments, contrairement à ce que l'on observe de la part de l'industrie dans d'autres pays. Le raisonnement invoqué est le niveau des prélèvements fiscaux et sociaux

pesant sur les entreprises empêche leur implication, alors qu'avec les niveaux inférieurs que l'on trouve dans d'autres pays, les entreprises peuvent trouver naturel de participer à des investissements dans des machines comme les synchrotrons. A ceci s'ajoute sans doute une meilleure vision de la part des entreprises étrangères de ce que des investissements de ce type peuvent leur apporter. Des facteurs psychologiques, culturels et sociaux font qu'en France, *"tout doit passer par l'Etat"*.

M. Jean-Claude LEHMANN a rappelé qu'il a suggéré dans diverses instances que les investissements dans les très grands instruments bénéficient d'un avantage fiscal, puisque aussi bien la fiscalité est une des seules armes de l'Etat dans nos économies ouvertes. Au demeurant, l'avantage fiscal est attrayant pour les entreprises comme le démontre le crédit d'impôt recherche, car il permet de convaincre que la recherche *"apporte quelque chose"* à court terme. Il est donc important d'avoir une réflexion dans ce domaine.

En tout état de cause, l'intérêt des entreprises pour les grands instruments ira croissant car lorsqu'il faut mener des développements de plus en plus rapidement, il faut des quantités d'information importantes dans des délais de plus en plus courts. Dans le cas de l'industrie verrière, le paradoxe est que, si *"l'on ne sait pas ce qu'est le verre"*, il faut aussi mettre au point des produits de plus en plus complexes.

M. Jean-Claude LEHMANN a exprimé la conviction que le rayonnement synchrotron sera de plus en plus nécessaire parce qu'il apporte une réponse rapide pour l'acquisition des données. S'il est difficile de savoir le nombre de lignes de lumière nécessaires pour la France, il est toutefois clair que *"l'on ne s'en sortira pas seulement en faisant le projet britannique"*.

En tout état de cause, quels que soient les projets, il faut d'emblée intégrer la dimension des relations avec l'industrie.

Une critique a été faite à SOLEIL, celle de ne pas intégrer la dimension européenne. Sur ce point, M. Jean-Claude LEHMANN adhère à la position du ministre de la recherche. Il faut effectivement une politique européenne au niveau des très grands instruments, de même que les Etats-Unis ont une politique globale en la matière. La dimension européenne doit s'ajouter aux projets nationaux, car les industriels sont désormais européens. Au demeurant, *"l'implantation a désormais une signification au niveau européen"*. Le projet SOLEIL a souffert en tout

état de cause de présenter des lacunes en ce qui concerne le "*raisonnement européen qu'il est souhaitable d'avoir*".

Toutefois, compte tenu de leur expérience avec l'ESRF, il est clair que les industriels auront besoin de davantage d'accès directs aux lignes de lumière, sans passer par les filtres des comités de programme et les collaborations avec les universitaires.

Au reste, "*nous n'avons pas été au bout de nos réflexions sur la nature de la recherche*", en dégageant les caractéristiques spécifiques de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée, de la recherche technologique et de la recherche industrielle. Mais il est un autre problème plus grave aujourd'hui.

La recherche fondamentale, indispensable pour accroître le capital de connaissances humaines, est une démarche qui appartient au fonds culturel de l'humanité. A côté de la recherche fondamentale, une grande partie de la recherche, y compris celle qui est effectuée dans les laboratoires publics, a une vocation d'application, en réponse à des demandes sociales très différentes. Or, à l'image du fonctionnement du cerveau tel qu'il est décrit par les biologistes, le même chercheur peut faire les deux mais en faisant probablement appel à des régions différentes de son cerveau. La recherche n'a certainement pas mené assez loin la réflexion sur cette question, un sujet au demeurant difficile.

Ce problème se pose avec le rayonnement synchrotron. L'industrie qui a des objectifs finalisés, peut certes traiter différents sujets dans le cadre de collaborations avec des laboratoires publics, mais le passage obligé par des comités de programme pour l'accès aux lignes de lumière rallonge les délais et met en évidence des différences de logique en terme de rapidité d'exécution des recherches.

M. Jean-Claude LEHMANN a déclaré son accord à une participation de l'industrie aux frais de fonctionnement des grands instruments, y compris aux frais d'amortissement de ceux-ci mais il a fait remarquer que les entreprises choisissent toujours la solution la plus économique. La collaboration avec les laboratoires publics qui permet de ne payer que le coût marginal, revêt un intérêt évident. En prolongement de ce qui est fait à l'ESRF, une réflexion préalable sur tous ces aspects est donc nécessaire si la décision est prise de construire un nouveau synchrotron en France.

S'agissant de la nécessité d'une ou deux machines, M. Jean-Claude LEHMANN a estimé que DIAMOND ne semble pas pouvoir répondre à tous les besoins de l'industrie. Certes, les conditions d'accès ne sont

pas encore connues mais il apparaît nécessaire de trouver la voie de construire une deuxième machine, soit " *clonée* " soit complémentaire, ce qui reste à déterminer.

Mais l'on ne saurait passer sous silence le problème des personnels du LURE. Une telle question ne se résout pas par un coup de baguette magique. L'expérience montre que les coûts d'une catastrophe humaine sont énormes. A cet égard, le LURE est un " *cas d'école* ". Le LURE comprend un ensemble de personnels dont un grand nombre ont des compétences rares. Quel avenir leur est-il proposé ?

Le surcoût de la catastrophe humaine qui se dessine ne semble pas pris en compte, ce qui est inacceptable du point de vue d'un industriel.

Au vrai, le problème majeur de la recherche publique est celui de la gestion des ressources humaines, qui, si elle était plus performante, permettrait de générer des économies considérables.

L'industrie consacre des moyens importants à la gestion de ressources humaines, pour écouter, former et mobiliser notamment les personnels. Dans la recherche publique, on ne sait qu'évaluer. L'exemple du CNRS est éclairant, avec un entretien par carrière et par chercheur, alors que l'industrie en réalise un par an. Compte tenu du poids de la recherche publique, il faut affecter des moyens importants à la gestion des personnels, ce qui peut générer un retour important.

S'agissant de la deuxième machine, si elle ne doit pas nécessairement être à Orsay, la question de sa localisation se pose néanmoins.

Le siège des activités de Saint Gobain se situe pour un tiers en France, un tiers dans les autres pays d'Europe et le dernier tiers ailleurs dans le monde. Pour autant, en l'état actuel des choses, une entreprise a besoin de posséder un fonds culturel, un besoin dont on ne peut d'ailleurs être sûr qu'il perdurera.

De quoi une entreprise a-t-elle besoin pour rester française ? Elle a certes besoin qu'une part importante de son capital soit française et que son président soit français, comme c'est le cas pour Saint Gobain.

Mais les conditions de production n'étant pas toujours compétitives en France, les produits pouvant être transportés sont d'ores et déjà produits ailleurs, ce qui laisse sur le territoire national les autres produits et les activités de distribution.

Dans ces conditions, l'un des apports essentiels de la Nation à ses entreprises est l'apport intellectuel que constituent l'éducation et la recherche. Une entreprise internationalisée comme Saint Gobain comprend certes des personnels de différentes nationalités mais détache beaucoup de salariés français à l'étranger.

Concernant la recherche, le groupe Saint Gobain, s'il n'a pas décidé d'externaliser sa recherche comme l'industrie pharmaceutique qui la confie de plus en plus à des "*start up*", crée de plus en plus de laboratoires à l'étranger.

Toutefois Saint Gobain construit en France à l'heure actuelle un laboratoire de 150 personnes, après avoir mis deux ans – un délai au demeurant inacceptable – pour obtenir un permis de construire.

En tout état de cause, c'est bien la recherche "*la plus précieuse*" qui sera faite en France, la recherche sur la technologie de base qui permet de garder des positions de compétitivité par rapport aux concurrents, dans des métiers qui se rationalisent au plan mondial. Pour cette raison essentielle, le groupe Saint Gobain tient à garder sa recherche d'importance majeure en France mais cette décision ne se justifie que si des compétences existent dans notre pays et si les moyens de la recherche publique sont accessibles.

A cet égard, la collaboration de proximité reste un avantage non négligeable, à la fois pour des contacts quotidiens et la confidentialité. Alors que Saint Gobain travaille en permanence avec 100 à 150 laboratoires universitaires dans le monde, il lui faut un point d'ancrage fort en France. A cet effet, d'une part la connivence avec la recherche française doit être renforcée, d'autre part il est nécessaire que ses chercheurs disposent de tous les moyens nécessaires, y compris le rayonnement synchrotron et que la recherche publique prenne en compte les objectifs de la recherche technologique. Même si le groupe Saint Gobain n'est pas un grand utilisateur du rayonnement synchrotron, l'existence d'un instrument national rentre dans ce cadre général.

M. Jean-Claude LEHMANN a conclu sa présentation en indiquant qu'il est certes possible d'aller au Royaume Uni voire en Allemagne mais ce n'est pas une décision neutre. En tout état de cause, "*il faudra probablement sortir de là avec deux machines dont une en France, dont le lieu ne devra pas obligatoirement être Orsay*".

Faisant état des informations rassemblées par le groupe de travail, **M. Pierre POINTU** a indiqué qu'elles convergent pour établir que le

synchrotron constitue un très instrument d'une nature particulière. Il s'agit d'un outil interdisciplinaire, utilisé par plus de 500 laboratoires en France pour des recherches dont 30 % seulement sont non appliquées ou fondamentales mais déboucheront sur une application à un horizon plus ou moins éloigné. Au demeurant, les synchrotrons constituent également un support précieux pour favoriser la collaboration entre l'industrie et la recherche publique.

Dans ces conditions, les critères d'accès à la machine et le management des lignes de lumière apparaissent-ils comme des éléments déterminants pour l'industrie ?

M Jean-Claude LEHMANN a fait connaître son accord avec cette analyse du rôle des synchrotrons. Même si leurs adversaires disent le contraire et soulignent l'importance supérieure du soutien aux petites équipes, les synchrotrons, de même d'ailleurs que les sources de neutrons, sont des équipements pluridisciplinaires et des lieux de rencontre dont le fonctionnement doit être optimisé à cet égard. Les synchrotrons ont ainsi un rôle structurant sur la recherche.

M. Gilles COHEN-TANNOUJJI a alors souligné que les propos de M. Jean-Claude LEHMANN corroborent les indications du rapport américain "*Unlock our future*". Pour les auteurs de ce dernier, il existe trois types de recherche : la première est la "*understanding driven research*", la deuxième est la "*targeted basic research*" et la troisième est la "*mission targeted research*". La recherche conduite avec les synchrotrons a son centre de gravité sur les deux dernières catégories, à savoir la recherche de base ciblée et la recherche sur objectifs. Au demeurant le synchrotron est un lieu privilégié pour la recherche académique et la recherche industrielle ainsi que pour leur collaboration.

M. Georges CHARPAK a alors indiqué avoir été frappé par les propos de M. Jean-Claude LEHMANN sur la gestion des ressources humaines. On peut à cet égard se demander s'il serait possible, compte tenu des résistances actuelles, d'implanter une nouvelle machine de 2,5 GeV ailleurs qu'à Orsay.

M. Jean-Claude LEHMANN a indiqué que l'on rencontre toujours des difficultés pour déplacer un laboratoire, fût-ce de quelques kilomètres comme le montrent les obstacles rencontrés par Saint Gobain pour le déplacement d'un de ses laboratoires du Pontet vers Cavillon, deux lieux pourtant proches l'un de l'autre. Tout montre que les personnels concernés acceptent de tels transferts à condition que des délais soient prévus, que des moyens importants permettent des dédommagements

et que des aides soient fournis pour résoudre les problèmes de scolarité et de mutation des conjoints.

A ce propos, **M. Pierre POINTU** a remarqué qu'un tel déplacement d'activité engendre des craintes naturelles qui se traduisent par des protestations et qu'il faut prendre en compte en aidant les personnels à être mobiles, par un travail de fond. Au demeurant, si la solution était retenue d'une dispersion des équipes du LURE, le problème ne se résumerait pas aux scientifiques pouvant retrouver une affectation sur la base de leurs compétences spécifiques mais concernerait également les personnels d'accompagnement. En tout état de cause, si l'on ne construit pas de machine en France, les coûts de continuation ou de fermeture du LURE devront être incorporés à ceux de la solution DIAMOND.

M. Philippe LAREDO a souligné que les conseils régionaux accordent souvent des aides à la mobilité et que moyennant une approche professionnelle, il est possible d'obtenir l'adhésion des personnels. Il reste la question des équipes d'accompagnement et celle des jeunes chercheurs dont la rupture avec le projet est d'autant plus facile qu'ils sont plus brillants. Par ailleurs, même s'il existe des traditions et des cultures scientifiques fortes dans notre pays, il est néanmoins possible de faire changer les choses. On peut regretter à cet égard qu'un consortium d'industriels n'ait pas accepté d'investir même 40 millions de francs dans le projet SOLEIL car cette participation l'aurait sans aucun doute fait avancer.

Une discussion s'est alors engagée sur la question des consortiums. **M. Jean-Claude LEHMANN** a remarqué à cet égard qu'à la différence des entreprises américaines, les sociétés européennes ont des difficultés à constituer des consortiums. Parmi les facteurs de blocage, on peut citer la crainte des autorités de la concurrence et les obstacles juridiques ou fiscaux mis en avant tour à tour par les juristes ou les fiscalistes de l'entreprise. Il est sûr que la création de consortiums devrait progresser en Europe.

M. Vincent MIKOL a précisé à cet égard qu'Aventis est engagé dans des consortiums européens qui fonctionnent d'une manière satisfaisante mais qui sont souvent initiés par des sociétés britanniques. Il semble effectivement qu'il y ait là une différence culturelle et fiscale par rapport au monde anglo-saxon.

M. Jochen SCHNEIDER a donné, pour sa part, des apaisements sur cette question. Des sociétés allemandes ont, en effet, racheté récemment des parts du consortium que 11 sociétés américaines ont

créé pour accéder à des lignes de lumière d'Argonne dédiées aux sciences de la vie.

M. Jean-Claude LEHMANN a précisé également que Saint Gobain participe à des consortiums d'entreprise aux Etats-Unis. Au reste, pour **M. Vincent MIKOL**, certaines de ces sociétés ne se lanceraient pas, si elles devaient aujourd'hui prendre position, dans un engagement à long terme sur des lignes spécifiques. Plutôt que d'avoir un accès permanent à des faisceaux de qualité moyenne, le choix serait aujourd'hui d'acheter du temps machine aux synchrotrons disposant des meilleures lignes sur le marché.

Par ailleurs, **M. Pierre POINTU** a estimé nécessaire que les choix relatifs aux investissements de recherche prennent en compte leurs retombées fiscales et sociales. La même dépense faite pour la construction d'une machine en France ou au Royaume Uni génère un retour d'un tiers pour le Trésor Public, en France ou chez nos voisins britanniques. En tout état de cause, il faut que l'Etat raisonne dans ses choix d'investissement pour le synchrotron en intégrant ce facteur, c'est-à-dire en élargissant le cadre d'analyse du BCRD au budget total de la France.

Après avoir remercié les participants pour le nouvel éclairage qu'ils ont porté sur la question du synchrotron **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a levé la séance.

Annexe (page suivante) :

Note remise aux Rapporteurs par les représentants du LURE

Note demandée par l'O.P.E.C.S.T. dans le cadre de la saisine

"Les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron"

sur :

"les déterminants du coût des synchrotrons et les moyens de limiter

les dépenses d'investissement et de fonctionnement afférentes"

Rédigée par M Bessière et J. Daillant avec le concours de D. Chandesris, R. Comes, R. Fourme, P. Lagarde, MP. Level, L. Mélard, P. Morin, M. Sommer, A. Tadjeddine, F. Wuillemier

Contacts: M. Bessière 0164468125 bessiere@lure.u-psud.fr

J. Daillant 0164468225 daillant@lure.u-psud.fr

1. les différents postes de coûts dans un synchrotron et notamment la répartition des coûts entre l'injecteur, l'anneau de stockage et les lignes de lumière (question 1)

Les chiffres donnés sont tirés de l'APD SOLEIL (voir tableau 3.2.1-1 du chapitre IX) et comprennent les aléas. Les coûts de construction hors salaire peuvent se répartir en trois gros postes, les pourcentages étant comparables d'une machine à l'autre :

- **bâtiments et infrastructures** : 437 MF **40%**
- **sources** : 345 MF **32%**
- **expériences** : 306 MF **28%**

Remarques:

- le poste **bâtiments et infrastructures** comprend les moyens centralisés en informatique (réseau notamment)
- le poste **sources** comprend en plus de **l'injecteur (80 MF)** et **l'anneau (190 MF)**, les éléments d'insertion pour les 14 lignes possibles de ce type (1.7MF en moyenne * 14) et les 24 premières têtes de lignes de lumière (1 MF en moyenne * 24)
- le poste **expériences** comprend la partie ligne de lumière (optique essentiellement), la partie station expérimentale et les laboratoires associés (préparation d'échantillons), évalué pour 24 lignes.

1. l'influence de l'énergie de la machine sur son coût final et les coûts d'une montée en énergie après la construction initiale (questions 2 et 5)

Deux cas peuvent être considérés :

- une machine conçue pour **1.5 GeV pouvant évoluer vers 2.5 GeV**

SOLEIL est pris comme référence de la machine 2.5 GeV.

Pour disposer in fine du nombre optimal d'insertions pour la machine de 2.5 GeV, l'anneau construit au départ pour fonctionner à 1.5 GeV comportera le nombre de cellules prévu dans une telle machine (16 cellules) et aura donc la circonférence nécessaire (337 m). Le bâtiment sera de taille très similaire à celui prévu sur SOLEIL. Le linac de 100 MeV reste inchangé, le booster garde la même circonférence mais fonctionne entre 100 MeV et 1,5 GeV.

- La seule **économie** sera sur la puissance des éléments magnétiques et des cavités accélératrices, donc en conséquence sur les infrastructures : électricité, refroidissement, climatisation. Elle peut être évaluée à **24MF** d'investissement et **15 MF** d'économie de fonctionnement sur 8 ans (en fait 4 ans de construction et 4 ans de réel fonctionnement) **soit un total de 39 MF** (voir détail du calcul en **Annexe 1**).
- Quand on passera de **1.5 GeV à 2.5 GeV** le coût sera alors de **43.7 MF**.
- Soit un **surcoût final de 5 MF** par rapport à construire dès le départ la machine à 2.5 GeV

(rappel : coût de construction (investissement + fonctionnement sur 8 ans) hors salaire = 1350 MF).

Remarque: pour le poste expérience aucune économie n'est à attendre, le nombre de lignes de lumière constructibles étant équivalent.

- une machine conçue pour rester **figée à 1.5 GeV**

Il existe pour chaque énergie de machine une taille minimale et un nombre de cellules optimum, donc de sections droites où l'on met les insertions. Ce nombre est de 10 à 12 pour une machine de 1.5 GeV. Le nombre possible de lignes de lumière va donc aussi diminuer avec l'énergie et in fine le coût peut être évalué en première approximation en prenant une loi linéaire en fonction de la taille de la machine.

L'investissement de 80 MF correspondant à l'APD SOLEIL sera perdu.

La perte de temps et le coût liés à une nouvelle APD est à considérer.

- En partant des coûts connus de l'ESRF (6 GeV) et avancés pour SOLEIL (2.5 GeV) on arrive à un coût de construction (investissement + fonctionnement sur 8 ans) hors salaire de **1180 MF** (voir détail du calcul en **Annexe 2**)
- Cette machine aurait des **performances** analogues à SOLEIL opérant à 1.5 GeV. Elles restent **très inférieures à SOLEIL opérant à 2.5 GeV** (voir **Annexe 3**).

Récapitulatif:

SOLEIL 2.5 GeV 1350 MF

Machine 1. 5 Gev pouvant évoluer à 2.5 GeV 1355 MF !!!

(économie = 39 MF; montée à 2.5 GEV = 44 MF)

Machine figée à 1.5 GeV

Avec une taille optimale 1180 MF

Avec une taille réduite 820 MF

-

Rappels importants:

- SOLEIL a été optimisé pour **2,5 GeV, énergie choisie après une large concertation de la communauté scientifique** à travers des ateliers (voir réponse à la question 10 "Les raisons du choix de l'énergie de SOLEIL à 2.5 GeV" dans le document "Réponse aux questions de l'OPECST février 2000").
- L'idée de construire une machine de **1,5 GeV ne correspond à aucune demande de la communauté scientifique**. La structure de base de cette machine hypothétique n'a été évidemment proposée par personne : des éléments importants comme la taille, l'énergie des faisceaux et surtout la brillance n'ont fait l'objet d'aucune définition.
- **Une machine de 1.5 GeV** ne répondrait ni à l'ensemble des besoins de la communauté des Sciences des Matériaux ni à ceux de la communauté des Sciences de la Vie : les deux communautés ont à la fois besoin des basses énergie (<1 KeV) et des moyennes énergies (>5 KeV). De plus cette énergie ne constitue pas un optimum pour satisfaire les besoins en basse énergie (voir l'exemple de l'ALS).
- **Une machine de 1.5 GeV devrait être complétée en plus par un accès à une machine d'énergie de 2.5 GeV ou plus, et donc le coût réel** d'une telle stratégie est :

machine de 1.5 GeV : 1930 MF (budget consolidé salaire compris sur 8 ans)

7 lignes onduleurs en Angleterre par exemple (chiffres comparables à ceux donnés par Y. Petroff):

350 MF (machine et infrastructures, chiffre annoncé par le ministère; pour 7 lignes de lumière sur éléments d'insertion ce chiffre paraît très sous-estimé à tous les experts)

100 MF (7 lignes avec insertions et têtes de lignes comprises)

480 MF (fonctionnement et salaires sur 8 ans)

sous-total: 930 MF

total: 2860 MF à comparer à SOLEIL 2100 MF

*Voir en **annexe 4** quelques remarques sur l'ALS (passage de 1.5 GeV initial à 1.9 GeV) et Doris (passage de 3 GeV à 4.5 GeV)*

1. la fourchette de coûts pour les types de ligne de lumière sur aimant de courbure, sur onduleur ou sur wiggler et les grandes catégories de coûts pour les différents types de postes expérimentaux, selon les techniques mises en œuvre (questions 3 et 4)

D'une manière générale les prix des lignes de lumière sont comparables quel que soit le type de source insertion (onduleur, wiggler) ou aimant de courbure. Dans le cas des onduleurs le coût de l'optique serait dû au fait que l'on cherche à utiliser les performances ultimes de la source en terme de focalisation ou résolution, pour les aimants de courbure au fait de corriger l'étendue horizontale de la nappe. Cette affirmation se comprend hors coût de l'élément d'insertion qui est compris dans le poste sources.

Par contre le prix d'une ligne de lumière va pouvoir fortement varier suivant la thématique menée sur la station expérimentale : dans le cas des études de surface la mise en place d'une MBE (Molecular Beam Epitaxy) va augmenter le budget jusqu'à 4 M, de même l'utilisation d'un détecteur CCD performant pour les études cristallographiques par exemple en Sciences de la Vie va aussi donner un coût additionnel de l'ordre de 4 MF.

Compte tenu d'une remise à jour du chiffrage de l'APD SOLEIL lié notamment aux gains en performance sur l'optique (alignement automatique, robotisation) et à la remarque précédente, nous avançons **un coût d'investissement hors salaire pour une ligne de lumière**, y compris la station expérimentale mais sans la tête de ligne (environ 1MF) et l'élément d'insertion (en moyenne 1.7 MF), **de 13 à 18 MF** (contre 12 MF dans l'APD SOLEIL). Ce prix est donné à partir d'exemples concrets empruntés à ELETTRA, à l'ESRF et aux lignes de LURE transférables sur SOLEIL (voir détail en **Annexe 5**).

Le chiffre de 20 MF pour une ligne de lumière avancé par certains part de l'évaluation à 12 MF auquel on ajoute les salaires du personnel nécessaire pendant la période de construction et de réception (4 ans).

2. la possibilité réelle de se limiter dans un premier temps à des équipements de base et de programmer dans le temps des équipements additionnels, afin d'étaler la charge d'investissement sur plusieurs années (équipement différé de sections droites; installation progressive des lignes de lumière) (question 6)

Dans le cas de l'APD SOLEIL cette stratégie a été proposée avec dans la phase de construction et de début d'exploitation (8 ans en tout) la mise en service :

- en phase 1 (années 1 à 4, avec en année 4 démarrage de la machine pour les utilisateurs) de 10 lignes de lumière (dont 4 venant de LURE) essentiellement sur élément d'insertion
- en phase 2 (années 4 à 8) 14 lignes supplémentaires (les 14 éléments d'insertion possibles seront alors occupés)
- en phase 3 (au delà de la 8^{ème} année) construction des 16 lignes restantes sur aimant de courbure

Remarques:

- *Cet étalement correspond aussi à ce qui a été fait à l'ESRF où la construction de 30 lignes de lumière dites publiques et sur élément d'insertion a été étalé sur 11 ans avec en plus la réalisation d'une dizaine de lignes CRG sur aimant de courbure.*

- *Construire encore moins de lignes dans la phase 1 et 2 serait un vrai gâchis comme l'a montré la mise en service d'autres installations où le programme expériences avait été réduit.*

1. les économies d'échelle en cas de regroupement de commandes en Europe pour différents équipements très onéreux et les économies d'échelle en cas de construction concertée de plusieurs machines similaires (questions 7 et 8)

Répondre directement à ces questions nous paraît difficile sans avoir une définition plus fine des projets à réaliser. Par contre nous pouvons donner quelques faits concrets:

- SOLEIL nécessite 32 aimants dipolaires, 160 quadripolaires et 108 hexapolaires. Il n'est donc pas possible de passer la commande à un seul constructeur car aucun n'a la capacité pour les réaliser de front!!
- Si on construit 2 radio-fréquences identiques on peut tabler sur une économie de l'ordre de 10%.
- Sur les bâtiments aucune économie est envisageable, vu qu'ils feront sans aucun doute appel à des entrepreneurs nationaux
- sur l'infrastructure cela est difficile à chiffrer, peut-être peut-on obtenir des prix au niveau du réseau informatique par exemple.
- sur les lignes, presque toutes sont différentes mais on peut imaginer un gain marginal sur une commande de plusieurs composants. A l'heure actuelle en Europe un consortium MULTEX (FMB, BESTEC, VARIAN, CABURN, IRELEC, ANKA) offre un catalogue comprenant un grand nombre de composants pour les lignes de lumière allant jusqu'aux miroirs et monochromateurs. De même la société britannique OXFORD a un tel catalogue. Les économies que l'on peut attendre sont de l'ordre de 15 à 25% sur les prix catalogues si on commande en grand nombre (une dizaine d'unités).

Rappel important : Des économies d'échelle sont envisageables en partant de la R et D quelle soit au niveau des machines (radiofréquence, magnétisme, vide, etc...) ou au niveau des lignes de lumière (optique adaptative, pilotage, alignement automatique, robotisation des prises de données, standardisation de certains éléments, etc....).

Il faut bien considérer de plus que dans la vie d'une installation synchrotron, la machine reste relativement figée, alors que les expériences sont essentiellement évolutives. Les collaborations et échanges à l'échelle de l'Europe, tant scientifiques que techniques,

sont donc primordiales pour minimiser les coûts et assurer un développement harmonieux et efficace.

Des exemples existent déjà de collaborations européennes dans ce domaine de la R et D: via l'accord tripartite entre la Grande Bretagne, la Suisse et la France (kickers de SLS développés avec LURE), avec le développement par le groupe SOLEIL-CEA-CNRS d'une cavité supra pour la radio-fréquence qui va être reprise par d'autres centres, par le prêt de bancs de mesure des éléments magnétiques par ELETTRA à SLS, etc...

Annexe 1:

Détail du coût d'une machine ayant la même structure que SOLEIL mais fonctionnant à 1,5 GeV avec possibilité de monter à 2.5 GeV

rédigé par MP Level

Investissement

Anneau et booster :

- **Eléments magnétiques** : Pour les dipôles, le champ passera de 1,57 T à 0,936 T. (rappelons qu'ils ont été optimisés aussi pour ce champ). On pourrait modifier légèrement l'épaisseur de la culasse et la dimension des bobines mais la différence de coût serait marginale car le coût de la matière ne représente que 10% du coût. De plus il serait exclu de changer ensuite l'énergie, enfin le coût des salaires de l'APD serait perdu, perte qui dépasserait certainement le gain.
- Les alimentations : Le courant étant dans le rapport des énergies, la puissance des alimentations de l'anneau va être x 0,36.

Le coût des alimentations étant proportionnel à la racine carrée de la puissance (évidemment cela dépend aussi de la technologie) on aura une diminution de coût de $28.484 \text{ MF} \times (1 - 0,6) = 11.395 \text{ MF}$.

- **Système RF (anneau):**

Le cryomodule et le système cryogénique restent inchangés tandis que la puissance de l'émetteur est réduite de 600 kW à 80 kW. Le coût passe de 9.4 MF à 2.3 MF

- **Système RF booster :**

L'émetteur passe de 1 MF à 0.200 MF

La diminution de coût est donc : $10.4 - 2.5 = 7.9$ MF

Infrastructures :

Il y aura une répercussion sur les infrastructures : L'alimentation électrique, le refroidissement :

Anneau : Elements magnétiques : 2200 kW passera à 792 kW

RF 1800 kW 400 kW

Booster : Elements magnétique : 1250 kW passera à 450 kW

L'ensemble du process passera de 5365 kW à 1642 kW alors que les autres besoins restent toujours à 3613 kW.

Le total est donc de 5255 kW et 6655 kW (avec le chauffage) au lieu 8441 et 9841 kW.

On pourra donc diminuer les capacités de l'installation :

Au niveau des postes électriques : économie de **1 MF**

Au niveau du groupe de froid : économie de **1,6 MF**

Au niveau de la tour de refroidissement : économie de **2,2 MF**

Le total de l'économie à l'investissement est donc de 24 MF

Fonctionnement :

L'économie par an sur l'électricité est de 3,5 MF et sur l'eau de 0,2 MF soit au total 3,7 MF.

Pour monter en énergie à 2.5 GeV, il faudra changer les alimentations soit 28.484 MF, changer les émetteurs soit 10,4 MF et augmenter la puissance des infrastructures soit 4,8 MF. Le coût total de l'opération sera de **43.7 MF**

Annexe 2:

Coût d'une installation en fonction de la taille de la machine

Nôtre estimation du coût (C) comprend le coût d'investissement et de fonctionnement hors salaires sur 8 ans pour la construction et l'exploitation à partir de l'année 4.

Remarque: Il existe pour chaque énergie de machine une taille et un nombre de cellules optimum, donc de sections droites où l'on met les insertions.

Deux types de calculs peuvent être fait:

- **C fonction linéaire de la taille de la machine : $C = a * \text{circonférence de l'anneau} + b$**

(dans cette hypothèse le nombre de cellules varie avec la taille conformément à la remarque précédente)

ESRF (6 GeV, 866m, 30 lignes): 2.5 milliard de francs = $a * 0.866 + b$

SOLEIL (2.5 GeV, 337m, 24 lignes): 1.35 milliard de francs = $a * 0.337 + b$

Donc en GF $C = 2.17 * \text{circonférence en km} + 0.62$

- Le nombre optimal de cellules est de 10 à 12 pour une machine de 1.5 GeV ce qui conduit à une machine de 260m et donc à un coût :

$$C (1.5 \text{ GeV}, 260\text{m}) = 1.18 \text{ GF}$$

- Si on prend l'exemple de MAX2 de 90m de circonférence et donc avec une émittance, une brillance et une durée de vie dégradées on arrive à:

$$C (1.5 \text{ GeV}, 90\text{m}) = 0.82 \text{ GF}$$

- **C fonction linéaire de l'énergie de la machine : $C = a * E + b$**

ESRF (6 GeV, 30 lignes): 2.5 milliard de francs = $a * 6 + b$

SOLEIL (2.5 GeV, 24 lignes): 1.35 milliard de francs = $a * 2.5 + b$

Donc $C = 0.33 * E + 0.52$

Soit **$C (1.5\text{GeV}) = 1.015 \text{ GF}$**

- le coût d'une telle machine doit donc être estimé dans la fourchette 800 MF à 1.2 GF avec des performances plus ou moins dégradées par rapport à SOLEIL opérant à 2.5 GeV.
-

Annexe 3:

Performances des sources à 2,5 GeV et 1,5 GeV

	Energie (Gev)	Haute brillance Tous les paquets remplis SOLEIL 500 mA dans 396 paquets			Structure temporelle SOLEIL 9 x 10 mA
		Durée de	Brillance	Durée de vie	

		vie				
			10 eV	1 keV	10 keV	
SOLEIL	2,5	20 h	10^{17}	$2 \cdot 10^2$ ₀	10^{19}	18 h
	1,5	1,8 h	10^{17}	$7 \cdot 10^1$ ₉	$6 \cdot 10^{15}$ Wiggler*	1,8 h
ALS	1,5	1,6 h	10^{17}	$5 \cdot 10^1$ ₈	10^{15} Wiggler	20 min

*La puissance délivrée par le faisceau sur les optiques est de 7 kW.

Annexe 4 :

Exemples de l'ALS et DORIS

En ce qui concerne l'ALS, tous les éléments de la machine étaient prévus pour l'énergie finale. La montée en énergie de 1,5 à 1,9 a seulement nécessité l'installation d'un nouveau système RF d'accélération, coût: quelques % du total machine.

En ce qui concerne DORIS on est passé d'un collisionneur e^+e^- double (2 x 3 GeV)(démarrage en 1973), à un seul collisionneur d'énergie 6 GeV, utilisant les éléments magnétiques initiaux reconstitués, puis à une source de rayonnement synchrotron (dédiée en 1993). En ce qui concerne la machine de rayonnement synchrotron, l'énergie de fonctionnement est de 4,5 GeV. Une des deux longues sections droites

a été modifiée en " by-pass " équipé d'insertions magnétiques séparées par de légères déviations pour la sortie de faisceaux de lignes onduleurs.

Annexe 5 :

Exemples de coût de lignes de lumière

Rappel: Les coûts de l'élément d'insertion et de la tête de ligne sont comptés dans celui de la machine. Ceci ne serait probablement pas le cas dans l'hypothèse d'achats de lignes sur des machines étrangères, il conviendrait alors de majorer les coûts donnés ci-dessous de 1MF pour les lignes sur aimant de courbure et environ de 2.7 MF pour les lignes sur élément d'insertion.

- **Ligne dans le domaine X (4-30 keV) :**
 - Evaluation faite à partir de la construction au LURE de la ligne H10 calculée pour être transférable sur SOLEIL (aimant de courbure):

Ligne (y compris l'infrastructure) 3.7 MF

Optique (monochromateur, miroirs) 4.3 MF

m
e
n
t
a
l
e
5
à
1
0
M
F
s
u
i
v
a
n
t
l
e
t
y
p
e
d
e
g
o
n
i
o
m
è
t

r
e
(
d
e
2
à
3
M
F
)
e
t
d
e
d
é
t
e
c
t
e
u
r
C
C
D
o
u
n
o
n
(

4
M
F
)

—
—
—
—
—
—

T
o
t
a
l

:

**1
3**

à

**1
8**

**M
F**

- Coût de la ligne D2AM/matériaux de l'ESRF (aimant de courbure) :

Coût total de l'ordre de **13 MF** dont 3 MF pour les miroirs et 2 MF pour le monochromateur

- Coût de la ligne ID1 de l'ESRF (onduleur) :

Coût total de l'ordre de **14.2 MF** sans le coût de l'onduleur avec une partie de l'optique étudiée et réalisée en interne

- **Ligne dans le domaine X-mou (> 1 keV) :**
 - Coût de la ligne APD d'ELETTRA (onduleur) :

Coût total de l'ordre de **13 MF** sans le coût de l'onduleur et avec des développements en interne de façon à tirer les prix
 - Evaluation faite à partir de la construction au LURE de la ligne SU5 calculée pour être transférable sur SOLEIL (onduleur):

Version LURE : 10MF avec station expérimentale mais sans l'onduleur (2.5 MF)

Adaptation pour SOLEIL: + 4 MF

Donc coût total de **14 MF**

Nous avançons un coût d'investissement hors salaire pour une ligne de lumière, y compris la station expérimentale mais sans la tête de ligne (environ 1MF) et l'élément d'insertion (en moyenne 1.7 MF), de 13 à 18 MF.

IX – Auditions de M. Vincent COURTILLOT, de M. Pascal COLOMBANI, et de M. Giorgio MARGARITONDO - mercredi 1^{er} mars 2000

Pour accueillir M. Vincent COURTILLOT, Directeur de la recherche au ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a précisé que, depuis le début de l'étude de l'Office parlementaire sur les conditions d'implantation d'un nouveau synchrotron, de nombreux intervenants ont été entendus mais que "*l'éclairage*" du responsable de la recherche en France est essentiel pour comprendre la motivation du ministre lorsqu'il a annoncé le 2 août 1999, l'abandon du projet SOLEIL et la signature d'un accord entre la France et le Royaume Uni sur DIAMOND.

M. Vincent COURTILLOT a commencé son intervention en rappelant que la décision citée par le Rapporteur avait été précédée par deux

conseils interministériels de la recherche scientifique et technique (CIRST) à la mi-1998 et la mi-1999. L'abandon de SOLEIL est donc une décision du Gouvernement dans son ensemble et du Premier ministre. Elle résulte de l'établissement de priorités et de choix effectués à l'intérieur du budget de la recherche, ce qui a conduit à revoir les équilibres entre les différents postes de dépenses.

Au demeurant, trois orientations majeures caractérisent la politique du Gouvernement dans le domaine de la recherche : d'une part la priorité à l'emploi de jeunes scientifiques, doctorants et post-docs notamment, d'autre part un soutien aux crédits de base des laboratoires et enfin, l'encouragement à l'innovation, qui s'est traduit par la loi Allègre sur l'innovation votée à l'été 1999. Pour atteindre ces objectifs, le Gouvernement dispose du BCRD (budget civil de recherche et développement), auquel il faut ajouter les crédits de l'enseignement supérieur relatifs à la recherche.

S'agissant des très grands équipements, dont les crédits ont atteint 4,6 milliards de francs en 1999, après une augmentation de 250 millions de francs de 1998 à 1999, la décision a été prise en 1998, confirmée et appliquée en 1999, de ne pas accepter pour l'année 2000 la continuation de la dérive de 200 millions de francs annoncée pour cette année, le spatial connaissant au demeurant les augmentations les plus fortes de ces dernières années.

Selon la nomenclature française, il existe en France environ 40 très grands instruments, en n'incluant pas encore, comme on le devrait peut-être, les grands équipements de l'informatique et de la biologie. Sur la recommandation du Conseil supérieur de la recherche et de la technologie, le ministère a amorcé une réflexion pour redéfinir l'enveloppe budgétaire des très grands équipements.

L'ampleur de l'investissement correspondant à un synchrotron classe ces derniers dans la catégorie des grands équipements. Le dossier d'un nouveau synchrotron a été abordé par le ministère dès 1997. C'est à la demande des ministres de la recherche que le CEA et le CNRS ont constitué un groupe de travail qui a délivré un rapport sur un nouveau synchrotron, l'avant-projet détaillé SOLEIL (APD).

L'analyse qui a été faite du projet SOLEIL par le ministère de la recherche a fait apparaître des points positifs et des points négatifs.

En premier lieu, la nécessité scientifique du rayonnement scientifique est acquise et il n'y a pas de remise en cause du fait que des besoins existent et doivent être satisfaits.

En second lieu, la qualité de l'APD SOLEIL et les mérites de l'équipe qui l'a conduite, en particulier ceux de M. J-F LACLARE, sont reconnus par les experts.

En troisième lieu, tous les avis recueillis sur l'APD SOLEIL sont positifs.

Toutefois le projet comportait des lacunes.

La première était la nécessité que la communauté scientifique considère les instruments d'analyse dans leur ensemble, en n'isolant pas le rayonnement synchrotron des sources de neutrons, des lasers de puissance et de la résonance magnétique nucléaire (RMN). Ceci répond d'une part à la réalité des meilleures expérimentations qui combinent souvent plusieurs méthodes d'analyse fine de la matière et d'autre part au souci du ministère de ne pas voir remonter des demandes de crédits indépendantes et concurrentes.

La deuxième lacune de SOLEIL était relative à sa prise en compte des différents champs scientifiques. L'avant-projet, au moins dans sa première version, ne dégagait pas suffisamment bien les développements scientifiques qu'il visait, avec en particulier une place au départ insuffisante – mais corrigée par la suite - accordée à la biologie.

La troisième lacune était celle d'un engagement industriel totalement absent du projet, sans perspective d'un engagement ultérieur.

La quatrième lacune était celle d'une dimension internationale insuffisante, alors que la nécessité avait été posée dès 1997 que les très grands équipements " *soient au moins réfléchis dans un cadre international et européen* ", même si chaque décision ultérieure ne doit pas obligatoirement être prise de construire le grand équipement à ce niveau, cette contrainte valant pour le CEA, le CNRS et le CNES.

Enfin, le Gouvernement a jugé que les groupes mandatés par le CEA et le CNRS n'avaient pas " *clairement établi l'ampleur des besoins en rayonnement synchrotron de la communauté scientifique* " et en conséquence le nombre de lignes et les caractéristiques de la machine à mettre à disposition des chercheurs dans un bref délai.

En conséquence, le choix du Gouvernement a été de segmenter le problème et d'apporter une réponse en plusieurs tranches. L'objectif a donc été " *de décider tout de suite la construction de nouvelles lignes et de fragmenter le complément nécessaire, tout en recherchant d'autres*

partenaires ", pour *" mieux connaître les besoins et faire évoluer les réponses au plan technique "*.

Dans cette approche, la coopération européenne occupe une place centrale. Dès la fin 1998, le ministre de la recherche est convenu, avec son homologue britannique, de l'opportunité d'étudier une solution commune susceptible de faire *" se rencontrer "* les projets SOLEIL et DIAMOND.

Les négociations conduites par les directeurs de la recherche, tant au Royaume Uni qu'à Paris, ont débouché sur la décision de construire une machine ensemble, avec au surplus la participation du Wellcome Trust.

Un groupe de travail a alors été formé par la Direction de la Recherche avec des représentants du CEA et du CNRS, groupe composé de 6 personnes dont deux représentants du CEA, deux du CNRS et deux du ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie, et présidé par M. René PELLAT, par ailleurs Haut-commissaire à l'énergie atomique. Ce groupe a déjà tenu plusieurs réunions à Paris et à Londres, et a reçu, comme c'est la règle dans les négociations internationales, un mandat de négociation confidentiel comportant un plafond des sommes à engager et un nombre de lignes minimal à obtenir en contrepartie. Les négociations devraient aboutir dans les mois qui viennent, et rien n'indique qu'un échec soit prévisible. Au demeurant, le chef du projet SOLEIL, M. Jean-Louis LACLARE fait partie du groupe de négociation.

En prenant comme référence les caractéristiques de SOLEIL en terme de prestations, *" on compte obtenir l'équivalent de la moitié de SOLEIL dans le cadre du projet franco-britannique "* alors que *" l'on est parti du tiers "*. L'idée est donc de *" mettre dans un premier temps à la disposition de la communauté scientifique la moitié de ce qu'elle avait réclamé à travers SOLEIL "*.

Une deuxième tranche est simultanément étudiée, sous la forme de la mise à disposition de lignes de lumière obtenues ailleurs.

M. Vincent COURTILLOT a rappelé que la première priorité scientifique retenue par le Comité interministériel de la recherche scientifique et technique est la biologie et les sciences de la vie. Une recherche de lignes complémentaires nécessaires dans cette perspective a donc été conduite en Italie, en Allemagne et en Suisse. Aucune possibilité n'existe aujourd'hui en Italie. Il existe des lignes en Allemagne mais leur prix, pour le moment, est jugé trop élevé. C'est en Suisse que la négociation est la plus avancée autour de la source SLS. Par ailleurs, il

existe une (voire deux) lignes disponibles à l'ESRF et la France a fait savoir son intérêt pour cette ligne, éventuellement dans le cadre d'un arrangement triangulaire avec l'Espagne. Il y aura donc un complément de lignes.

L'ensemble de la première et de la deuxième tranches représenteront environ 60 à 75 % de la solution SOLEIL.

Pour la suite, M. Vincent COURTILLOT a estimé "*ne pas avoir une information suffisamment claire pour savoir s'il faut acquérir des lignes en plus ou construire une machine supplémentaire en France ou ailleurs, ou une machine complémentaire d'une autre nature (laser, source de neutrons)*".

D'où une autre décision, celle de constituer un groupe de travail européen, dont les derniers développements datent de la dernière semaine de février 2000.

Sur le point de très grands équipements, la décision du ministre de la recherche est que la réflexion se fasse à l'échelle européenne, ne coïncidant pas obligatoirement avec l'Union européenne.

L'idée de "*coopérations à géométrie variable*" dans les discussions est privilégiée par le ministre, comme elle le sera d'ailleurs, au plan général, lors de la Présidence de l'Union par la France au 2^{ème} semestre 2000. Au demeurant, cette approche recoupe les orientations de M. Philippe BUSQUIN, Commissaire européen à la recherche, telles qu'il les a exposées dans son document "*Vers un espace européen de la recherche*".

C'est ainsi qu'a été formé récemment un groupe formé des Directeurs de la recherche de 5 pays – France, Royaume Uni, Allemagne, Italie, Espagne –, porté à 6 avec le Portugal pour la flotte océanographique, auquel s'ajoutent un représentant de la Fondation européenne de la science et un représentant de la Commission européenne. Ce groupe de travail ("senior officials") est chargé de mettre en place 3 sous-groupes techniques chargés de réaliser une analyse des besoins dans 3 secteurs.

Le premier groupe technique traitera des besoins en méthodes d'analyse fine de la matière, au premier chef le rayonnement synchrotron mais aussi les sources de neutrons, les lasers de puissance et la résonance magnétique nucléaire. Ce groupe a reçu une lettre de mission adoptée il y a 10 jours. M. Vincent COURTILLOT a demandé au CEA et au CNRS de lui proposer une liste de noms d'experts

susceptibles de siéger dans ce groupe, liste au sein de laquelle il choisira les candidats à soumettre aux autres pays.

Le deuxième groupe technique fera une analyse de la flotte océanographique européenne, avec la participation du Portugal, très engagé dans ce domaine avec sa proposition de création d'une Agence européenne de la mer.

Le troisième groupe étudiera les cas de l'astronomie et de l'astrophysique.

Les travaux de ces groupes techniques se dérouleront sur une période de 6 mois à 2 ans. Il s'agit de groupes temporaires auxquels est assigné un programme précis. Leur fonction est de faire des recommandations, dont chaque pays "*fera ultérieurement ce qu'il veut*". En tout état de cause, cette démarche donne la garantie qu'une réflexion "*multi-techniques*" et "*multi-pays*" aura été conduite au préalable.

Parallèlement à ce programme à 5 (ou 6 pour la flotte océanographique), un groupe de travail sur les très grands équipements rassemblant l'ensemble des pays de l'Union européenne a été formé en février 2000 par la Commission européenne. Ce groupe a lancé une série de travaux qui seront au centre des échanges prévus dans 8 différents forums, et la séance finale se déroulera en septembre 2000 à Strasbourg. Le sous-groupe technique formé par les 5 pays sur les méthodes d'analyse fine de la matière, se réunira en mars, avril et mai, présentera un pré-rapport en juin 2000 à Rome, à la réunion des directeurs de la recherche scientifique et technique et participera au séminaire de Strasbourg en septembre.

Au-delà de cette réflexion sur les grands équipements, le Gouvernement a arrêté les axes prioritaires de sa future action à la Présidence de l'Union européenne au deuxième semestre 2000, étant établi que le contenu du 6^{ème} PCRD (programme communautaire de recherche et développement) ne sera pas décidé avant 2001.

En ce qui concerne le MENRT, la première priorité de la présidence française sera le renforcement de la mobilité des chercheurs. La deuxième sera l'application du principe de subsidiarité à la recherche, les actions communautaires devant s'attacher d'abord à coordonner les initiatives nationales, à les rendre complémentaires et éventuellement à les compléter. La troisième priorité de la présidence française sera que les crédits du PCRD continuent d'alimenter non seulement le programme "*Access to Large Infrastructures*" mais également

participent au financement de la conception et de l'exploitation des très grands équipements.

Après avoir remercié M. Vincent COURTILLOT, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur** a estimé qu'après trois mois d'investigations sous forme d'entretiens approfondis avec des spécialistes de tous horizons et de visites sur le terrain, notamment en Allemagne et au Royaume Uni, les synchrotrons ne semblent pas être des grands instruments comme les autres.

Les synchrotrons apparaissent comme des éléments " fédérateurs " de communautés scientifiques différentes, leur permettant d'accéder à des capacités de recherche énormes.

Par ailleurs, comme l'a démontré la visite des installations de DESY à Hambourg, les jeunes chercheurs sont impliqués dans le fonctionnement des synchrotrons, ce qui fait aussi de ces grands instruments très particuliers des outils de formation.

Enfin, la proximité du synchrotron par rapport aux utilisateurs joue un rôle important et les visites effectuées en Allemagne et en Grande-Bretagne ont montré l'ardeur de ces pays à développer ces machines dont ils ne voudraient pour rien au monde se départir.

Il y a là un élément important qui dénote sans doute un changement. Le fait qu'il y ait des grands équipements dans un pays et qu'au surplus ils soient concentrés sur une plate-forme dotée d'un ensemble de moyens – synchrotron, lasers, source de neutrons – semble jugé essentiel.

La coopération internationale est évidemment une nécessité et l'on ne saurait avoir une démarche nationaliste dans ce domaine. Toutefois, comme on l'a constaté à Hambourg, la coopération internationale ne se décide pas au sommet mais doit être initialisée par les chercheurs eux-mêmes.

Au reste, un accord est nécessaire au plan européen, ne serait-ce qu'en raison du fait que de nouvelles orientations existent dans les très grands équipements. Ainsi les lasers à électrons libres méritent-ils toute notre attention et justifient-ils d'une coordination internationale car il s'agit d'un champ de " recherche à risque ", en ce sens que les investissements y sont lourds pour des résultats aléatoires.

Au contraire, le rayonnement synchrotron est stabilisé et s'ouvre d'ailleurs à des applications industrielles de plus en plus nombreuses,

s'éloignant de la notion d'aléas habituelle pour d'autres très grands équipements.

Tout en étant ouverts à une coopération, les Rapporteurs de l'Office ont ressenti avec acuité que tous les pays ont la volonté d'avoir des sources nationales dans le domaine du rayonnement synchrotron. La France, pour sa part, semble faire d'autres choix. Toutefois, M. René PELLAT a indiqué, lors de son audition par l'Office qu'il y aurait peut-être en France, une source additionnelle différente de SOLEIL, d'une énergie de 1,5 GeV.

Or les exemples sont nombreux de synchrotrons construits avec ce niveau d'énergie et dont il a été ultérieurement indispensable de hausser l'énergie. Tous les experts consultés par le groupe de travail se retrouvent pour estimer qu'il existe un optimum d'énergie à 2,5 GeV, où se trouve la plénitude des potentialités du rayonnement synchrotron.

Au demeurant, sans avoir d'a priori sur la question, force est de constater que la solution DIAMOND ne répond pas à l'ensemble des besoins du Royaume Uni et donc encore moins à ceux de l'ensemble anglo-français et qu'il existe logiquement un mouvement général en Europe en faveur des sources nationales.

M. Vincent COURTILLOT a alors déclaré n'avoir "*aucun problème*" avec les propos du Sénateur TRÉGOUËT. Le plan énoncé en début de réunion est "*valable aujourd'hui*".

Concernant les difficultés à résoudre pour les très grands instruments, M. Vincent COURTILLOT a exposé l'exemple des sources de neutrons dont les spécialistes soulignent l'insuffisance par rapport à la demande. Or il s'est produit un surinvestissement dans le passé. La France dispose de deux sources, l'une en propre au Laboratoire Léon Brillouin (LLB), l'autre en coopération internationale avec l'Allemagne et le Royaume Uni à l'Institut Laue Langevin (ILL) de Grenoble. Or, des difficultés de financement sont apparues au LLB en 1999, avec la demande adressée à l'Etat de pallier à hauteur de 60 millions de francs l'impossibilité arguée par ces organismes de couvrir toutes les dépenses.

Alors même que des discussions ont été lancées avec ces deux organismes, le ministère de la recherche a dû lui-même tenter de trouver des solutions de remplacement, en proposant $\frac{1}{4}$ de la machine au Portugal, qui a rapidement renoncé, et à l'Espagne, qui semble réellement intéressée, et un autre $\frac{1}{4}$ aux Pays de l'Est dans le cadre d'une coopération financée par la France.

Au surdimensionnement des sources de neutrons, correspond "*une dérive importante des synchrotrons*". Il est symptomatique que la communauté de base ne puisse accepter qu'on ne satisfasse pas ses demandes dans leur totalité. La demande de la base est certes légitime mais il faut une "*contre-réaction*". Si l'on considère que lorsque la base scientifique s'exprime, l'Etat doit automatiquement et intégralement satisfaire sa demande, alors on confond le fond et l'amplitude finale à satisfaire. Or, des incertitudes existent sur les besoins estimés, comme le montre la différence du simple au double entre le chiffrage de certains experts et celui du CNRS.

Comme il a été rappelé plus haut, les orientations actuelles expriment une volonté politique. La première priorité choisie par le ministre de la recherche a été de prendre en compte les besoins des laboratoires avec le renforcement du soutien de base qui leur est accordé. En fait, une méthode envisageable dans ce cadre serait de demander aux laboratoires à quelle hauteur ils seraient désireux de financer les très grands équipements, en distraquant à leur profit une part de leurs crédits.

Par ailleurs, le Royaume Uni ne possèdera pas de machine nationale après la fermeture du synchrotron de Daresbury, alors que la France dispose sur son sol de l'ESRF et de plusieurs autres grands équipements.

En tout état de cause, le recours à une machine européenne "*copossédée*" avec le Royaume Uni n'a rien de "*scandaleux*". D'ailleurs les meilleurs chercheurs français vont déjà travailler en Allemagne ou aux Etats-Unis sur d'autres machines. Au reste, il n'est que de se rappeler les "*combats*" survenus à propos de la localisation de l'ESRF à Strasbourg ou Grenoble et la décision de dernière minute en faveur de cette dernière ville, pour constater que les décisions sur des problèmes de type suscitent toujours des protestations.

S'agissant d'une deuxième machine de rayonnement synchrotron, qui serait installée en France, "*la question reste ouverte*".

A cet égard, le rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques et la réflexion demandée au CNRS enrichiront la réflexion du groupe technique des 5 pays européens.

Quant à la question de savoir quelle devrait être l'énergie d'une seconde machine, les points de vue sont contradictoires et le ministère n'a pas conclu en l'espèce. S'il est démontré qu'une machine de 1,5 GeV au demeurant moins onéreuse n'est pas une bonne chose, alors "*on attendra*". Il faudrait alors examiner la compatibilité de la

construction d'une machine de 2,5 GeV sur le territoire national avec l'enveloppe totale du rayonnement synchrotron (et de l'ensemble des grands équipements) dans notre pays. Au demeurant, en fonction de l'approche globale du Gouvernement, s'il est établi que le rayonnement synchrotron avec une machine de 2,5 GeV doit être la première priorité en France, alors il faudra qu'il soit bien compris que ni la RMN haut champ ni les lasers de puissance ne seront au premier rang.

Au reste, l'évolution prévisible du budget de la recherche à partir de 2001 n'est pas sans influence. En prolongement des efforts faits au niveau des contrats de plan Etat-régions, le ministère de la recherche demandera une forte augmentation de son budget, après la croissance modérée des années précédentes.

M. Vincent MIKOL a rappelé à cette occasion la volonté du Gouvernement de développer la génomique autour de génopôles. On peut se demander à cet égard si la post-génomique sera développée autour d'Evry ou non et si l'option d'installer les ressources en rayonnement synchrotron au Royaume Uni ne conduira pas à l'installation au Royaume Uni et non pas en France du tissu de jeunes entreprises ou " *start up* " que le Gouvernement appelle par ailleurs de ses vœux.

A cette occasion, **M. Vincent COURTILLOT** a dit son étonnement vis-à-vis du fait que les industriels ne prennent aucun engagement sur le projet SOLEIL et a porté un jugement " *sévère* " sur leur attitude, une attitude que **M. Vincent MIKOL** a expliquée par l'absence de crédit d'impôt pour une participation dans un tel projet.

Pour **M. Vincent COURTILLOT**, les conditions du succès de la post-génomique ne se limitent pas à la question du rayonnement synchrotron, une idée approuvée par **M. Vincent MIKOL**.

M. Vincent COURTILLOT a ajouté que le succès dans ce domaine dépend aussi de la création d'un véritable réseau de génopôles et d'autres centres, ce vers quoi le Gouvernement se dirige avec détermination. Si les urgences en matière de génomique ont encore à être précisées, ce domaine est celui qui bénéficie du plus gros programme financé par le FRT et le FNS sur le BCRD. Au demeurant, contrairement à ce qu'une vision nationale voudrait faire croire, le choix du Royaume Uni ne rend pas impossible le post-génomique en France. Avec une mobilité accrue, la France bénéficiera de possibilités très importantes à Oxford.

En réalité, il est nécessaire de " séquencer " le problème en matière de rayonnement synchrotron. La solution actuelle est une solution non fermée. M. Vincent COURTILLOT a également jugé " sévèrement " le fait qu'une coopération européenne n'ait pas été mise en œuvre avant le présent Gouvernement, en particulier par une coordination entre les directeurs de la recherche scientifique et technologique européens. Il est vrai, à cet égard, que la Commission européenne était alors défavorable à une coordination à géométrie variable.

Au reste, selon M. Vincent COURTILLOT, le Wellcome Trust envisagerait, le cas échéant, de financer des opérations de recherche en France, avec même la possibilité de participer au financement de la construction d'un synchrotron en France, si le Gouvernement britannique optait pour le site de Daresbury. En tout état de cause, tant le directeur de la recherche britannique que les représentants du Wellcome Trust ont estimé que si la question d'une machine binationale avait été posée il y a 4 ans, le Royaume Uni aurait pu donner son accord à une installation en France. Or la communauté française du rayonnement synchrotron a refusé à l'époque à la fois l'offre britannique et la proposition suisse d'un travail en commun. M. Vincent COURTILLOT a jugé ces deux points " dommageables ", tout en rappelant que la communauté britannique du rayonnement synchrotron avait également repoussé cette orientation.

M. Georges CHARPAK a estimé importante cette information et indiqué être " gêné " par des informations contradictoires. Ainsi, il ressort du compte rendu du voyage récent des Rapporteurs en Angleterre que le CLRC n'est pas intéressé par une coopération avec la France sur SOLEIL.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a alors précisé qu'au cas où des commandes groupées seraient passées pour bénéficier d'économies d'échelle, à la suggestion de M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF, le Royaume Uni serait alors évidemment intéressé.

Sur ce point de l'intérêt du Royaume Uni pour une coopération avec la France et sur ses modalités, **M. Vincent COURTILLOT** a indiqué que la position du CLRC est énoncée in fine par le seul directeur général des Research Councils, son homologue, M. John TAYLOR.

Revenant sur la question d'un deuxième synchrotron, M. Vincent COURTILLOT, qui a jugé " astucieuse " la solution PELLAT, a souligné que la solution présentée par M. PETROFF de deux machines identiques n'a pas de " sens " dans le calendrier actuel et qu'il s'agit d'une façon théorique d'aborder le problème.

En effet, en décembre 1998, la décision a été prise par la France et le Royaume Uni de construire une machine en commun, une décision confirmée par des travaux ultérieurs et annoncée le 2 août 1999. Depuis lors, selon M. J-L LACLARE, le projet DIAMOND a fait des " progrès ". La France est avancée dans ce calendrier.

En tout état de cause, la construction d'un deuxième synchrotron pour générer des économies d'échelle de 20 à 30 % entraînerait des dépenses supérieures à ce que le Royaume Uni et la France peuvent allouer au rayonnement synchrotron.

En conséquence, il faudrait aussi reconstruire un deuxième projet conjoint, avec la participation additionnelle d'autres pays, comme l'Espagne, peut-être, et de l'Union européenne. Le délai serait en toute hypothèse d'un à deux ans, alors même que personne ne demande qu'on attende davantage.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, ayant suggéré qu'une telle proposition soit faite au Gouvernement britannique, **M. Vincent COURTILLOT** a avancé que le Royaume Uni travaille depuis 6 mois sur la coopération avec la France et que le projet qui résultera des efforts communs est déjà bien au-delà de SOLEIL et de DIAMOND, dont il ne portera d'ailleurs pas le nom.

Faisant part de ses interrogations, **M. Georges CHARPAK** a alors stipulé qu'on peut considérer avec faveur un laboratoire central avec une coopération entre physiciens et biologistes, dans la mesure où l'accès à des lignes de lumière " à droite à gauche " ne semble pas satisfaire les besoins. Puisque le LURE existe, on peut souhaiter que le LURE devienne l'équivalent du Rutherford Appleton Laboratory de Didcot. Un synchrotron de 1,5 GeV serait séduisant dans cette perspective, mais cette solution de 1,5 GeV est rejetée par la communauté des synchrotrons.

Dans la discussion qui a suivi sur l'éventualité d'un synchrotron de 1,5 GeV, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a rappelé que les Etats-Unis ont augmenté de 1,5 GeV à 1,9 GeV-2 GeV l'énergie de leur machine de Berkeley. **M. Georges CHARPAK** a ensuite précisé alors qu'il s'agit de la meilleure machine du monde, pour la seule biologie structurale toutefois, selon **M. Vincent MIKOL**.

Devant l'espoir émis par **M. Georges CHARPAK** que ce synchrotron puisse constituer le pivot d'une coopération internationale, **M. Vincent COURTILLOT** a jugé fondamental d'avoir un centre internationale à l'ESRF de Grenoble et un centre européen à Didcot, la

France rejoignant la position du Wellcome Trust sur ce point de la localisation de la future machine.

Au surplus, la France est intéressée par la disposition d'un laboratoire en plus de l'accès à une machine, Oxford fournissant un ensemble exceptionnel de laboratoires et de chercheurs auxquels les chercheurs français " se frotteraient " avec profit. En tout état de cause, il faut mettre en place un équilibre européen pour la recherche.

S'agissant d'une machine à 1,5 GeV, M. Vincent COURTILLOT a assuré entendre les mêmes arguments. Certes, le passage de 1,5 à 1,9 GeV améliore les performances. Mais il a appelé les membres du groupe de travail à replacer les propos qui leur sont tenus dans le cadre de stratégies particulières visant à tirer parti du poids de l'Office parlementaire.

En tout de cause, M. Vincent COURTILLOT a précisé que ses propos retracent " *ce qui se fait et est décidé* ".

Au reste, M. Vincent COURTILLOT a fait le pronostic, si tant est qu'une telle décision eût été prise, que, lorsque des machines de 2,5 GeV seraient en construction, une certaine communauté dirait qu'une machine de 1,5 GeV eût été fondamentale.

S'agissant de la formation des jeunes chercheurs, la localisation du synchrotron à Evry, Strasbourg ou Lille n'a pas d'importance.

S'agissant du LURE, il n'est pas question de le fermer du jour au lendemain. Il existe en effet des compétences remarquables. Quand on connaîtra la carte des machines en Europe, ses compétences pourront être utilisées d'une part pour construire des expériences dont les mesures seront faites ailleurs, et d'autre part pour assurer la formation des jeunes. Une fois connue la carte des machines en Europe, on saura s'il faut une énergie de 2,5 ou de 1,5 GeV, la troisième tranche étant ouverte.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, s'étant interrogé sur l'existence d'une lettre adressée aux responsables du LURE et évoquant la fermeture de celui-ci, **M. Vincent COURTILLOT** a fait part de son étonnement devant le fait que la direction du LURE n'ait pas demandé de rendez-vous au ministère, ait refusé une rencontre proposée par M. Olivier KAHN à M. COMES et rejette l'idée du partenariat avec le Royaume Uni.

M. Georges CHARPAK a alors exprimé sa stupeur et jugé qu'il s'agirait d'une faute professionnelle si cela était établi. Au reste, le débat est "*parasité*" par des affirmations contradictoires - ainsi par exemple en ce qui concerne la dépendance du Wellcome Trust envers le laboratoire Glaxo Wellcome, attestée par certains et démentie par d'autres – ainsi que par le fait les interlocuteurs de l'Office "*n'assument pas*" toujours leurs positions publiquement.

S'agissant des relations entre le ministère et le LURE, M. Vincent COURTILLOT a donné des indications sur leur évolution récente. Le conseil d'administration tel qu'il devait se tenir début janvier avait un ordre du jour "*routinier*", sans "*référence à l'avenir*" du laboratoire. En conséquence, M. Vincent COURTILLOT a écrit à l'administrateur général du CEA et au directeur général du CNRS pour leur rappeler qu'il ne lui paraissait pas opportun que le conseil d'administration ne se pose pas la question de l'avenir du LURE et que ses propositions comportent deux volets.

Le premier volet de ce plan relatif au LURE consiste, compte tenu de l'obsolescence de la machine, à maintenir les contrats pour une durée de 2 à 3 ans. Un biseau de 2 à 3 ans supplémentaires serait alors envisagé, le temps que les autres lignes soient disponibles (DIAMOND, Suisse). Le deuxième volet se rapporte à l'élaboration d'un plan de mobilité ou d'arrivée progressive à la retraite pour les ingénieurs et chercheurs les plus âgés, plan complété par une affectation des équipes à d'autres centres, afin de maintenir les compétences autour d'un appareillage. Le troisième volet est celui d'un recentrage sur la construction d'expériences, déjà évoqué précédemment.

En conséquence, le conseil d'administration prévu initialement en janvier 2000 a été repoussé à février 2000.

Au demeurant, il s'agit d'un plan sur environ 7 ans avec un financement des coûts prévisibles. En tout état de cause, il n'a jamais été question de fermer le LURE du jour au lendemain.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a souligné que les perspectives assignées au groupe de travail des 5 Européens paraissent prometteuses parce qu'il lui est fixé comme objectif de conduire une analyse multi-techniques et multi-pays. Il s'est réjoui du fait que les réflexions de l'Office parlementaire, au demeurant très riches, viennent alimenter la réflexion de ce groupe, démontrant ainsi que ce n'est pas perdre du temps que d'aller au fond des problèmes.

Pour **M. Vincent COURTILLOT**, la nomination et les convictions de **M. Philippe BUSQUIN**, Commissaire européen à la recherche, sont des points extrêmement positifs. Son intérêt pour le projet franco-britannique est réel, de même que son intention d'examiner la possibilité d'une aide à lui apporter.

Par ailleurs, M. Vincent COURTILLOT a tenu à faire le point sur les réflexions quant au "*devenir*" d'Orsay. Il est un fait que la perspective d'arrêter le LURE a entraîné beaucoup d'inquiétudes et de désarroi. Mais il s'agit d'un "*plan social d'évolution scientifique*".

Le travail confié au directeur de l'Ecole supérieure d'électricité, M. J-J DUBY sur l'avenir du plateau de Saclay s'ajoute au plan de contrat quadriennal présenté par le Président de l'université de Paris Sud Orsay pour constituer un plan ambitieux de développement d'Orsay et de sa région. L'objectif est d'affirmer la vocation de cet ensemble dans l'optoélectronique, les micro et nano technologies, en accompagnement du centre national de recherche technologique de Marcoussis, ainsi qu'en informatique avec l'INRIA et l'Ecole polytechnique, et enfin de lancer Orsay dans la génomique structurale pour devenir, avec l'Institut Pasteur et l'université Paris V, des éléments de la génopôle Ile-de-France dont la tête de réseau est Evry.

Les retombées de ce plan rendu possible par des crédits importants et une coordination efficace, dépasseront celles qu'aurait permise la construction de SOLEIL à Orsay.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a souligné une nouvelle fois que toutes les disciplines scientifiques utilisent un outil commun, le synchrotron, fondamental pour conduire leurs recherches. En outre, cet outil est un élément important de la politique de la recherche, en tant qu'instrument de proximité et de formation. Que le devenir du plateau de Saclay-Orsay soit tenu pour important est une bonne chose. Mais les Rapporteurs de l'Office ont constaté au cours de leurs déplacements qu'il existe en Europe un mouvement de fond en faveur de la constitution de centres possédant plusieurs sources fédérées autour de synchrotrons, ce que l'avenir devrait confirmer.

M. Vincent COURTILLOT a alors rappelé que les deux premières priorités fixées par l'Etat en matière de recherche sont la biologie et les technologies de l'information. En réalité, il appartiendrait à la communauté des biologistes dotée de 600 millions de francs par an supplémentaires et à celle des sciences et techniques de l'information et de la communication qui reçoit quant à elle 250 millions de francs additionnels, de voir si elles souhaitent spontanément en allouer, le cas

échéant, une partie au rayonnement synchrotron (ou à une autre technique), sur la base d'une évaluation de leurs besoins. Si, au surplus, l'optoélectronique décidait d'en faire autant, le budget d'une deuxième machine serait bouclé avec une contribution d'une centaine de millions de francs de l'industrie.

Abordant d'autres dimensions du problème, **M. Jean GALLOT** a souhaité revenir sur les contraintes de la décision. Les auditions réalisées par le groupe de travail des Rapporteurs de l'Office, ont montré des divergences sur les économies réalisées dans le cadre du plan du ministère grâce à la location de lignes, ainsi que des points de vue contrastés sur la possibilité réelle de diminuer les coûts de construction d'un synchrotron grâce à une diminution de son énergie. Au regard de ces incertitudes sur le coût du plan du ministère, la dépense annuelle additionnelle pour le CNRS, correspondant à la construction de SOLEIL, ressortit à 30 millions de francs par an.

De surcroît, en regard de l'imprécision actuelle du projet DIAMOND, il existe un avant-projet détaillé SOLEIL, celui-ci bien réel, qui permet un démarrage immédiat de la construction d'un synchrotron moderne.

De fait, l'on ne peut que s'interroger sur les avantages économiques et financiers de la solution DIAMOND par rapport à SOLEIL.

Pour conclure ce débat, **M. Vincent COURTILLOT** a estimé qu'un "*problème de fonctionnement de l'Etat*" est posé à l'occasion du dossier synchrotron. Bien sûr, le Parlement a à connaître, a priori, du programme du Gouvernement mais ne peut entrer en discussion avec celui-ci à ce niveau de détail. Dans le cas contraire, il ne serait pas possible de prendre des décisions "*avec un jugement permanent*". M. Vincent COURTILLOT a en outre considéré qu'il lui appartient de décider et qu'il revient au Parlement de juger. Pour sa part, en tant que géophysicien, il estime qu'il n'a pas à "*rentrer dans des querelles techniques*".

S'agissant des très grands équipements dont les crédits atteignent 8,5 % du BCRD, il faut avoir à l'esprit que la station spatiale européenne ISS consomme 600 millions de francs par an et nécessitera la même somme de nombreuses années. Avec un total de 3 milliards de francs, ce dernier programme coûte à lui seul près de deux synchrotrons SOLEIL. En même temps, comme on l'a vu précédemment, il manque 60 millions de francs par an pour le financement de la source de neutrons Orphée du Laboratoire Léon Brillouin.

Après avoir remercié M. Vincent COURTILLOT, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur,** et **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur,** ont accueilli M. Pascal COLOMBANI, administrateur général, pour qu'il leur expose la position du CEA sur la question d'un nouveau synchrotron.

*

M. Pascal COLOMBANI, administrateur général du CEA, a expliqué son souhait de rencontrer les Rapporteurs et leur groupe de travail à la fin du cycle de leurs auditions, afin d'avoir le temps de se former une opinion pendant le court laps de temps séparant cet entretien de sa nomination et d'apporter des éléments complémentaires de ceux fournis par M. René PELLAT, Haut commissaire, déjà auditionné.

M. Pascal COLOMBANI a indiqué vouloir traiter des interactions entre la question du rayonnement synchrotron et les objectifs généraux du CEA.

Les objectifs généraux du CEA sont d'assurer la pérennité de la force de dissuasion et de la propulsion nucléaire, de contribuer au développement de l'électronucléaire civil, d'accroître ses travaux sur les sources d'énergie alternatives, de jouer un rôle fédérateur en matière de techniques nucléaires et de participer au développement de certaines nouvelles technologies constitutives de la nouvelle économie par les applications de ses propres recherches.

Pour le CEA, le synchrotron est une "*affaire importante*", en raison de l'intérêt des techniques qui sont mises en œuvre pour leur construction, en raison des applications nombreuses du rayonnement synchrotron pour les recherches du CEA, et de ses besoins spécifiques en "*lignes chaudes*" et pour des applications militaires. En bref, l'intérêt du CEA pour les synchrotrons est un intérêt de "*physicien et de concepteur*", ainsi qu'un intérêt d' "*utilisateur*".

Au reste, la recherche, en tant qu'activité "*globalisée*", est une activité sans frontière. Ceci vaut autant pour la recherche fondamentale que pour la recherche technologique. Il existe incontestablement une concurrence entre la France et les pays du monde entier, en particulier avec les Etats-Unis qui bénéficient, pour leur part, d'effets d'échelle, avec le Japon et de plus en plus avec d'autres pays comme l'Inde et la Chine où la formation est excellente et où il est possible de "*court-circuiter*" certaines étapes de développement. Dans ces conditions, il est indispensable que l'Europe et la France restent compétitives.

Les membres de la direction du CEA ont déjà été appelés à témoigner devant l'Office, ainsi que le Haut commissaire M. René PELLAT, chargé par le ministre de la recherche d'une réflexion sur la question du synchrotron. Les besoins du CEA en termes de lignes de lumière ont d'ailleurs été précisés dans une note précédente remise aux Rapporteurs.

Le CEA, pour sa part, a pris acte de la décision du ministre, jugeant par ailleurs " futile " de faire des actions de " guérilla ". Dans cette décision, l'administrateur général ne voit globalement que des avantages et juge que pour les chercheurs du CEA, les avantages contrebalanceront largement les inconvénients temporaires.

Le premier avantage est la volonté d'eupéaniser les très grands équipements. L'Europe doit apprendre en effet à tirer parti d'économies d'échelle. Avec un Commissaire européen attentif à la question, c'est incontestablement une bonne chose de voir l'Europe envisager d'investir dans les très grands équipements, au-delà de son action présente consistant à favoriser les échanges de chercheurs.

Au vrai, la mobilité existe déjà à grande échelle, comme le montrent les exemples du CERN, de l'ESRF ou de l'ILL. Cette mobilité est avantageuse, en ce qu'elle accroît la créativité et la productivité des chercheurs. En toute hypothèse, la communauté scientifique doit s'habituer à se déplacer plus fréquemment et à considérer qu'il est tout aussi normal d'aller à Londres qu'à Marseille.

Le deuxième avantage que voit l'administrateur général à la décision du ministre est que celle-ci est sous-tendue par une " rupture thématique ". Le projet franco-britannique a en effet une orientation marquée " biotechnologies ", ce qui se justifie par les résultats obtenus par le Royaume Uni, notamment à Oxford et Cambridge, alors qu'il est vrai, là aussi, qu'il existe encore en France une priorité à la physique. Il est à cet égard logique que, pour atteindre un nouvel équilibre entre les domaines de recherche, il soit fait recours à la coopération franco-britannique.

Le troisième avantage provient de l'évolution du mode de financement. Qu'une association comme le Wellcome Trust finance la recherche est un concept plus familier à l'étranger qu'en France, et ce type d'intervention est d'ailleurs plus fréquent dans le domaine de la recherche médicale qu'en physique.

En tout état de cause, " nos chercheurs ont besoin de ruptures dans leur mode habituel d'opérer ".

Il existe donc une logique dans la décision qui apparaît être sa vertu essentielle, la possibilité additionnelle de faire des économies apparaissant comme positive mais "*pas essentielle*". En toute hypothèse, l'important est de savoir "*ce que l'on veut faire, pourquoi et à quel endroit*".

Par ailleurs, M. Pascal COLOMBANI a rappelé que le Haut commissaire a émis l'idée d'une machine dédiée et a indiqué "*qu'il y croit beaucoup*". Tant pour les biotechnologies et les recherches sur les matériaux, l'important, en particulier pour les applications industrielles est la souplesse et le retour sur investissement. "*L'idée d'une machine dédiée, plus légère mais bien adaptée à un domaine particulier est une idée porteuse*".

Une telle machine pourrait être accessible en "*self service*", avec la possibilité de "*venir*" et "*de s'en aller*", sans autre formalité. "*C'est cela qui intéresse les industriels*", sans pour autant supprimer le besoin d'accéder en plus à un grand synchrotron, pour des recherches plus amont ou nécessitant des moyens différents.

En substance, le raisonnement du Haut commissaire est que si l'on dispose d'une machine de "*grande énergie*", il en faut aussi une de "*petite énergie*". Dans ces conditions, pourquoi ne pas considérer une machine dédiée à des marchés particuliers et si possible implantée en France, même si le caractère international de sa mise en œuvre doit être reconnu ?

A cette occasion, M. Pascal COLOMBANI a fait part de sa surprise de voir le nombre de synchrotrons construits de toute part et s'est interrogé sur la logique d'un tel phénomène.

Quant au CEA, il a recensé ses besoins, tout en étant prêt à s'installer "*n'importe où*". S'agissant de sa participation financière, "*le CEA contribuera à hauteur de la satisfaction de ses besoins*".

M. Pascal COLOMBANI, qui a participé au conseil d'administration du CNRS mais n'a pas eu de contact avec le LURE, a ajouté être "*frappé par les aspects émotionnels et un dogmatisme difficile à admettre*" de la part de la communauté du synchrotron qui, considérant qu'elle a un synchrotron, en demande un autre "*sans qu'on prenne en considération les besoins réels*".

A cet instant de l'exposé de M. Pascal COLOMBANI, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, a souligné l'effet passionnel renforcé par l'esprit d'équipe du LURE, une communauté

menacée de disparaître. En effet, les équipes de chercheurs qui se sont constituées, se sentent menacées de dissolution, ce qui représente un préjudice grave non seulement pour elle-même mais également pour la communauté scientifique dans son ensemble.

Pour **M. Pascal COLOMBANI**, *"cette communauté forte doit essayer"*. *"Pour que les choses progressent, il faut qu'elles évoluent"*. Dans le domaine scientifique, *"une communauté qui n'essaime pas disparaît"*. Un exemple existe en physique nucléaire, de laboratoires *"réduits à leurs murs"*.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, est intervenu pour signaler que les Rapporteurs sont à quinze jours d'énoncer leurs recommandations. Or il apparaît que le rayonnement synchrotron joue un rôle spécifique par rapport aux autres très grands équipements. La preuve en est que des synchrotrons sont demandés par les communautés scientifiques respectives de l'Allemagne, du Royaume Uni, de l'Italie et de la Suisse.

Il s'agit en effet d'un lieu *"fécond"* pour des *"fertilisations croisées"*. Grâce à cet outil se produisent des rencontres fréquentes et fructueuses, ce que les communautés nationales comprennent parfaitement.

Au demeurant, ce qui est préparé pour Orsay est important, mais sa communauté scientifique aura besoin d'un outil comme le synchrotron, ainsi que le montrent les exemples de Hambourg et de Didcot.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a estimé qu'en toute hypothèse, la coopération internationale doit se placer à un *"niveau supérieur"*, correspondant à des *"machines non normalisées"* comme par exemple les lasers à électrons libres dont l'importance a été notée lors de la visite effectuée au laboratoire DESY de Hambourg. Il existe au contraire des machines d'application du rayonnement synchrotron qui correspondent à un besoin national.

En définitive, s'est interrogé M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, *"la France positionne-t-elle le travail entre Européens à son bon niveau ?"*.

M. Georges CHARPAK a répondu que les succès de l'ESRF, un synchrotron de 6 GeV utilisé à 3 GeV, démontrent qu'il est *"fécond que ce soit une machine européenne"*. Le choix d'une énergie de 3 GeV permettait que ce fût une machine européenne.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a par ailleurs souligné que plus de 1100 étudiants travaillent sur les accélérateurs et les synchrotrons de Hambourg. En tout état de cause, il serait impossible d'envoyer ces 1100 étudiants à Didcot, ceci démontrant que "*la proximité est nécessaire*".

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, a ensuite souligné qu'il entre dans les fonctions du CEA des missions confidentielles, notamment en matière de défense, pour lesquelles la coopération avec le Royaume Uni nécessiterait des précautions dont on ne peut être sûr d'ailleurs de l'effectivité.

M. François GOUNAND, directeur des sciences de la matière au CEA, a indiqué que le CEA qui utilise les installations du LURE et opère sur les lignes chaudes de synchrotrons américains, résout déjà ce genre de problèmes. Il a estimé en outre qu'il n'est pas acquis qu'il y ait un blocage du Royaume Uni vis-à-vis de l'installation d'une ligne chaude sur le quota demandé.

M. François GOUNAND a par ailleurs estimé que la réflexion sur une nouvelle politique européenne en matière de très grands instruments s'impose pour une autre raison. La France possède en effet deux laboratoires nationaux possédant des grands équipements largement ouverts sur l'extérieur, d'une part le LURE d'Orsay avec ses synchrotrons DCI et Super ACO et d'autre par le Laboratoire Léon Brillouin de Saclay avec la source de neutrons Orphée.

Si ces trois grands équipements comprennent environ 30 % d'utilisateurs étrangers, la France n'est dédommée de cette contribution européenne qu'à hauteur des sommes reçues dans le cadre du programme européen "*Access to Large Facilities*", soit 6 % environ et par le biais de l'accès gratuit de ses propres chercheurs à des installations étrangères. Il ne semble pas que ce manque à gagner soit supportable longtemps.

Un échange s'est ensuite amorcé sur l'importance de la proximité d'un synchrotron pour ses utilisateurs. **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur** a estimé que cette proximité est nécessaire pour les chercheurs. **M. Georges CHARPAK** a estimé à cet égard que "*Paris n'est pas la France*".

Une autre question a ensuite été traitée, à savoir quel type de grand instrument doit faire l'objet d'une coopération internationale.

Pour **M. Pascal COLOMBANI**, il convient en effet de se demander quelle répartition adopter entre la " *science à risque* " et la recherche industrielle. Il semble bien qu'en matière de rayonnement synchrotron, il soit nécessaire d'avoir à la fois des grandes machines et des machines dédiées susceptibles d'accueillir les industriels et les étudiants.

M. François GOUNAND a par ailleurs signalé la difficulté actuelle pour avoir, sur des machines " *top niveau* ", des lignes peu sophistiquées jouant le rôle de " *passeurs d'échantillons* ".

M. Jean GALLOT a estimé quant à lui qu'il est aujourd'hui indispensable en France de pouvoir utiliser des machines " *top niveau* " mais aussi d'avoir une liberté d'accès à une machine de qualité. Au demeurant, le lieu d'implantation d'un tel synchrotron d'accès direct n'est pas " *innocent* ". Certes, il serait souhaitable que le financement de ce synchrotron bénéficie d'une contribution européenne. Mais qui pourrait nier que la proximité soit " *utile* " pour les étudiants et les industriels ?

Au surplus, il existe une tendance pour les entreprises à implanter un établissement ou un laboratoire, voire même à se créer aux environs immédiats des très grands équipements et de leur communauté de recherche.

S'agissant du groupe de travail formé par les Rapporteurs, il a dépassé la stricte défense, au demeurant légitime, d'un instrument particulier pour réfléchir à ce qu'il est opportun de faire pour les 20 prochaines années dans le domaine du rayonnement synchrotron.

En tout état de cause, la seule réponse européenne est " *biaisée* ", car il existe de nombreux pays européens qui investissent dans de très grands instruments.

Ainsi le Royaume Uni est déterminé à avoir de grands instruments sur son sol. Le lieu d'implantation apparaît en définitive comme fondamental au plan économique et universitaire.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a ensuite fait valoir que l'appel aux différentes communautés scientifiques pour le financement des très grands instruments suppose une diversification préalable des crédits de la recherche, un objectif difficile à atteindre au demeurant en France. Si les recettes des organismes de recherche provenaient de sources réellement diversifiées et indépendantes, pourquoi ne pas vouloir, en effet, que l'INSERM, par exemple, participe directement au financement des grands instruments ?

M. Pascal COLOMBANI a avancé, à cet égard, qu'à la différence de l'INSERM qui aurait sur ce sujet un point de vue d'utilisateur et pourrait en tant que tel participer au financement d'un synchrotron, le CEA a un rôle différent de " *fédérateur* ", qui va au-delà de sa responsabilité de s'assurer que des accès sont possibles pour ses propres chercheurs.

M. Vincent MIKOL a alors fait remarquer la participation du NIH (National Health Institute) à la construction de synchrotrons américains. Il a estimé par ailleurs, que, si la biologie structurale représente 30, puis 40 voire 50 % de l'utilisation des synchrotrons, il serait logique de voir l'INSERM jouer un rôle dans leur financement.

M. Pascal COLOMBANI a noté par ailleurs que dans le sillage du NIH, un dispensateur de crédits plutôt qu'un organisme de recherche, les instituts de recherche américains, qui se gèrent eux-mêmes, font preuve d'une souplesse et d'une adaptabilité très grandes.

A ce moment de la discussion, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur** a demandé à l'Administrateur général si l'organisation britannique des grands instruments avec un Laboratoire central concevant et exploitant ces derniers pour le compte de l'ensemble des organismes de recherche lui paraît pertinente.

M. Pascal COLOMBANI a répondu que, de son point de vue, la Direction de la Recherche en France " *fait son travail* ". Elle a " *les moyens de proposer des décisions et de les faire avaliser par les organismes* ". L'organisation française ne lui paraît pas mauvaise, avec, au surplus, la possibilité de constituer des groupements d'intérêt public, comme celui construit par le CNRS et le CEA.

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, a remarqué que la formation de groupements présenterait l'avantage de permettre une mutualisation des fonds nécessaires à la construction des très grands instruments et faciliterait sans doute la nécessaire mise en place d'un mécanisme d'amortissement.

La question des études portant sur la matière radioactive a fait l'objet des échanges ultérieurs.

M. Christian NGO a évoqué les contraintes des travaux conduits dans le domaine du nucléaire, que ce soit pour la défense ou pour l'électronucléaire civil. Dans le schéma d'une participation française à DIAMOND, il sera nécessaire d'une part que ce synchrotron soit doté de lignes dites " *chaudes* " adaptées à l'étude d'échantillons radioactifs et d'autre part de les y transporter. Or s'il est possible de transporter des

échantillons radioactifs à l'étranger, comme le fait déjà le CEA, notamment aux Etats-Unis, les formalités administratives sont toujours complexes et les coûts de transport élevés.

En conséquence, **M. Georges CHARPAK**, tout en soulignant qu'il s'agira là d'un domaine limité par rapport au total des emplois de la machine, a jugé souhaitables d'une part une participation du ministère de la Défense dans un grand instrument comme le nouveau synchrotron qui complètera utilement le laser MégaJoule, et d'autre part une implication de COGEMA dans son financement.

S'agissant des besoins du CEA en temps d'accès pour l'analyse d'échantillons radioactifs nécessitant des lignes "*chaudes*", **M. François GOUNAND** a rappelé qu'ils s'élèvent à 0,8 ligne de lumière équivalent temps plein, soit 20 % du total de 4 lignes de lumière correspondant à l'ensemble des besoins du CEA.

En conclusion à ce débat, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a alors rappelé aux participants, les recommandations de M. Yves PETROFF, rencontré à plusieurs reprises par les Rapporteurs, à Paris et à Grenoble, sur le site de l'ESRF.

Pour ce spécialiste reconnu mondialement et recruté par l'université de Californie à Berkeley pour y être bientôt professeur de physique des particules, il existe incontestablement des besoins parallèles en France et au Royaume Uni. Pour lui, par ailleurs, l'existence d'un optimum d'énergie à 2,5 GeV ne fait aucun doute. Enfin, grâce à une programmation judicieuse de la construction de deux machines, l'une en France et l'autre au Royaume Uni, il serait possible de dégager des économies de l'ordre de 20 à 30 %.

Cette approche apparaît pertinente. Avec des machines "*normalisées*", il sera sans doute possible de diminuer sensiblement les coûts de construction. En tout état de cause, il devrait être possible de bénéficier d'économies d'échelles si l'on programmait "*tous ensemble*" la construction de machines reposant sur des mêmes "*standards*".

Pour autant, il faut noter que ces arguments ont été balayés "*d'un revers de la main*" par les interlocuteurs de l'Office au Royaume Uni.

En réponse, **M. Pascal COLOMBANI** a confirmé que les prix diminuent toujours avec des effets de série. On peut toutefois estimer qu'avec un nombre total de 2 machines, l'économie serait faible et ne porterait guère que sur les coûts d'étude. La situation serait bien sûr différente si l'on construisait un grand nombre de synchrotrons identiques. Mais au

demeurant, la question centrale est celle des besoins. Deux machines identiques sont-elles nécessaires ou au contraire faut-il faire une " grande " machine et une machine différente ? M. Pascal COLOMBANI a alors exprimé de nouveau son souhait " *d'aller vers des machines dédiées. Par ailleurs, le concept de deux machines identiques situées l'une en France et l'autre en Grande-Bretagne, irait contre tous les avantages d'eupéanisation, thématiques et autres précédemment cités* " .

Après avoir remercié M. Pascal COLOMBANI et ses collaborateurs pour leur participation à leurs travaux, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, et **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, ont invité M. Giorgio MARGARITONDO à exposer son point de vue sur la question d'un nouveau synchrotron en France.

*

M. Giorgio MARGARITONDO, Coordinateur de la Table ronde européenne sur le rayonnement synchrotron, a indiqué que cet organisme a été créé spontanément à l'initiative des directeurs de synchrotrons européens, afin de réfléchir aux conditions d'une utilisation transnationale des synchrotrons et à la coordination des initiatives pour éviter toute duplication inutile. Financée par la Commission européenne, elle rassemble au plan européen tous les laboratoires nationaux de rayonnement synchrotron ainsi que ceux dont les efforts portent sur les lasers à électrons libres.

Initiative décentralisée, la Table ronde est aujourd'hui utilisée par les institutions européennes, notamment dans le cadre du programme européen " *Access to Large Facilities* ", dont l'objectif est, comme on sait, d'aider les chercheurs européens à accéder aux très grands instruments du continent.

Pour la Table ronde européenne, la double question de SOLEIL et de DIAMOND est une question capitale.

La disparition sans remplacement des sources du LURE et de Daresbury serait un changement radical en Europe.

Le constat fondamental fait par la Table ronde est en effet qu'il existe un " *déficit* " en Europe en termes de lignes de lumière disponibles.

Si l'on considère l'ensemble de l'Europe, la demande de temps d'accès à des lignes de lumière est en moyenne supérieure de 190 % à l'offre

disponible. Dans des cas particuliers, par exemple ELETTRA, la demande d'accès atteint même 260 % de l'offre.

C'est pourquoi la Table ronde, d'une part, a clairement soutenu SOLEIL et a d'ailleurs adressé des lettres dans ce sens au Premier ministre, M. Lionel JOSPIN, au ministre de la recherche, M. Claude ALLEGRE, et, d'autre part, s'inquiète du devenir du LURE.

Telles sont les positions officielles de la Table ronde européenne du rayonnement synchrotron.

A titre personnel, M. Giorgio MARGARITONDO a toutefois estimé qu'il faudrait " *avoir un cadre précis pour les besoins français* ". Il est utile de noter qu'en matière de cristallographie des protéines, il serait certes important de pouvoir disposer de lignes de lumière au Royaume Uni. Toutefois, dans des domaines de pointe comme la spectroscopie à haute résolution et la méthode EXAFS, la France dispose d'équipes occupant une place privilégiée dans le monde.

S'agissant de l'opportunité de deux machines de même énergie, il faut " *examiner les besoins réels* ". Au demeurant, si la France se lance dans un programme de pointe dans le domaine de la cristallographie des protéines, il lui faut aller au-delà des moyens nécessaires en rayonnement synchrotron et mettre en place un programme général.

Pour ce qui concerne le niveau d'énergie souhaitable pour une éventuelle deuxième machine, les besoins en faisceaux de très haute énergie sont déjà satisfaits par les accès à l'ESRF. En tout état de cause, une machine intermédiaire de 2 à 3 GeV permettrait sans aucun doute de répondre aux besoins de la cristallographie des protéines, qui requiert des faisceaux d'énergie de 12 à 20 keV.

Toutefois, si l'on veut faire de la spectroscopie à haute résolution, M. Giorgio MARGARITONDO a estimé que les onduleurs à grande énergie produisent des harmoniques supérieures qui rendent une machine d'énergie de 2 à 3 GeV difficile à utiliser.

Explicitant les propos de M. Giorgio MARGARITONDO, **M. Georges CHARPAK** a estimé qu'ainsi " *on parasite le rayonnement en dégradant son énergie* ". Le raisonnement distinguant les synchrotrons de 2,5 à 3 GeV de ceux de 1,5 GeV a donc une " *consistance* ".

Dans le débat qui a suivi sur ce point, **M. Vincent MIKOL** a estimé que la communauté scientifique de la méthode EXAFS comprend environ 300 personnes en France.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur a rappelé l'évolution constatée sur le synchrotron de Berkeley, dont l'énergie a été portée de 1,5 à 2 GeV. Il semble établi, à cet égard, qu'une optimisation de l'énergie d'un synchrotron est possible, de façon à permettre de mettre en œuvre un ensemble de méthodes d'analyse satisfaisant une vaste gamme de besoins. Au demeurant, le coût réel d'une machine dédiée devrait être étudié avec soin, notamment en prenant en compte les dépenses à engager pour augmenter son énergie.

En tout état de cause, il existe un historique des synchrotrons dans le monde dont il faut tenir compte.

A propos de l'augmentation de l'énergie d'un synchrotron de 1,5 GeV, **M. Georges CHARPAK** a noté que, si la France était "*copropriétaire*" d'une machine britannique à hauteur de 7 lignes de lumière, la question ne se poserait pas. Il a par ailleurs demandé à M. Giorgio MARGARITONDO son point de vue sur les différences entre les synchrotrons de 3^{ème} et de 4^{ème} génération.

M. Giorgio MARGARITONDO a estimé que "*l'on sait faire aujourd'hui des machines plus performantes*" que celles de 3^{ème} génération actuellement en service.

A cet égard, M. Giorgio MARGARITONDO a expliqué que les temps de faisceau de la cristallographie sont notamment diminués, avec des manipulations qui pourraient au demeurant faire l'objet d'automatisation, notant ultérieurement que, dans les autres types de recherche, "*les temps de faisceau sont souvent de quelques semaines*".

Au reste, les deux types de recherche de pointe – travaux nécessitant des faisceaux de haute ou de basse énergie – semblent à M. Giorgio MARGARITONDO, d'égale importance.

Ainsi, les nanotechnologies et les systèmes électroniques à très faible densité font intervenir des phénomènes dont la compréhension est encore "*primitive*". Leur étude est toutefois possible avec des rayonnements de basse énergie, quelques électrons volts. Il s'agit là de voies nouvelles de recherche pour lesquelles une haute résolution est impérative.

Dans le même ordre d'idées, il convient également de remarquer que pour un autre domaine, celui de la supraconductivité à haute température, les recherches ne sont pas conduites à Berkeley (2 GeV) ou à Argonne (7 GeV) mais sur les synchrotrons de Stanford ou du

Wisconsin, deux synchrotrons de la génération précédente et d'une énergie peu élevée.

M. Georges CHARPAK a continué les propos de M. Giorgio MARGARITONDO en relevant qu'une machine de 1,5 GeV qui n'est pas optimisée pour faire de la cristallographie, peut quand même en faire. Ainsi, le LURE accueille des biologistes qui ne travaillent pas avec des faisceaux de haute énergie.

Poursuivant sa description des recherches menées dans le domaine des basses énergies, **M. Giorgio MARGARITONDO** a souligné les nouvelles applications du rayonnement synchrotron dans le domaine médical. Les progrès effectués permettent de passer de l'analyse d'échantillons de petite dimension à la résolution de 1 μm , ce qui ouvre de nouveaux champs en néobiologie et en écologie.

Au final, dans le domaine du rayonnement synchrotron, la biologie ne se résume pas aux rayons X. De surcroît, il convient de ne pas sacrifier les autres communautés scientifiques en ne satisfaisant que les seuls besoins de la cristallographie.

En toute hypothèse, la France aura accès aux ressources du Royaume Uni pour la cristallographie des protéines. Si tel n'était pas le cas, alors il conviendrait de construire un synchrotron de 2,5 GeV.

En réponse à une question de **M. Gilles COHEN-TANNOUDI** sur les relations entre la Table ronde européenne du rayonnement synchrotron, la Fondation européenne de la science et le groupe de travail cité par M. Vincent COURTILLOT dont l'importance va croître à l'avenir, **M. Giorgio MARGARITONDO** a indiqué qu'il n'y a pas de relation officielle mais une collaboration informelle.

M. Giorgio MARGARITONDO a par ailleurs estimé qu'il n'y a pas d'idée précise actuellement sur les besoins de la cristallographie des protéines, et que "*personne ne sait ce que sera le domaine nouveau de la génomique structurale*". Mais, en tout état de cause, il se pourrait que une "*crise*" apparaisse, car "*il n'y aura pas de spécialistes en nombre suffisant*". M. Giorgio MARGARITONDO a par ailleurs appelé à "*ne pas perdre de domaine de recherche en France*".

Un dialogue s'est alors développé entre M. Georges CHARPAK et M. Giorgio MARGARITONDO. **M. Georges CHARPAK** lui a demandé de préciser, dans la mesure où il aurait encore des liens avec le projet helvétique, si la Suisse serait intéressée à participer à un synchrotron de 1,5 GeV.

M. Giorgio MARGARITONDO a alors indiqué que, si la Suisse avait finalement choisi le niveau de 2,5 GeV, c'était parce qu'on avait considéré qu'il était impossible d'ignorer les besoins de l'industrie pharmaceutique nationale dans un projet d'une telle envergure. S'agissant de l'intérêt d'autres communautés scientifiques que celle des rayons X pour une machine française de 1,5 GeV, il convient de poser la question aux intéressés. Il a ajouté qu'au demeurant, l'industrie pharmaceutique suisse ne participe pas au financement de la construction de l'anneau mais va probablement participer à celui de différentes lignes de lumière.

M. Vincent MIKOL, directeur de recherche chez Aventis, après avoir travaillé pour un laboratoire pharmaceutique suisse, a confirmé que des entreprises suisses ont bien participé au financement de lignes de lumière sur le synchrotron ESRF (ligne suisse-norvégienne).

M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, se référant à sa visite du Deutsche Elektron-Synchrotron (DESY) de Hambourg, a indiqué que pour un projet de collisionneur linéaire comme TESLA, il faut une coopération européenne.

Quant aux synchrotrons d'application, il s'agit d'un tout autre problème, la seule question étant celle de leur répartition en Europe. A cet égard, les effets de synergie et de proximité sont essentiels.

M. Giorgio MARGARITONDO a ensuite rapporté sa récente conversation avec M. Jochen SCHNEIDER, qui lui a indiqué que "*le laser TESLA a fonctionné*" la semaine dernière, une information importante à ses yeux. Au reste, la source TESLA est une source à impulsion différente des synchrotrons habituels. En réalité, si le projet TESLA est indispensable pour développer les lasers à électrons libres, ces derniers sont justiciables d'une coopération européenne.

Au demeurant, un modèle ressort de l'expérience de la Table ronde européenne. "*Des sources nationales gérées indépendamment sont indispensables jusqu'à une certaine taille, les besoins pour les énergies les plus élevées étant satisfaits par l'ESRF*".

La raison en est que le poids de la bureaucratie est moins "*dangereux*" au niveau d'un synchrotron national, "*la gestion nationale garantissant plus de souplesse et d'efficacité*".

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, a abondé dans ce sens, en estimant que les sources nationales sont à même de mieux

fonctionner grâce à une direction unique, ce que **M. Georges CHARPAK** a contesté.

M. Giorgio MARGARITONDO a souligné par ailleurs l'utilité du programme " *Access to Large Facilities* " de la Commission européenne. Il a cité également le programme de coopération sur les instruments, dans le domaine de la polarisation circulaire, qui met en jeu des sommes faibles et permet un partage des résultats fructueux.

M. Gilles COHEN-TANNOUDI, a fait alors un retour sur les propos de M. François GOUNAND du CEA qui soulignait, en début de réunion, l'avantage de l'ouverture du LURE sur l'étranger mais l'inconvénient que la France ait à sa charge le financement des dépenses correspondantes. Il s'est demandé si les procédures de collaboration internationale distinguent d'une part entre le financement de la source et d'autre part celui des lignes de lumière et des stations expérimentales et s'il serait possible de trouver des améliorations dans ce domaine, en imaginant des " *tours de table* " spécifiques pour ces équipements périphériques.

M. Giorgio MARGARITONDO a répondu par l'affirmative. Il a également pointé la réciprocité qui existe dans les accès aux synchrotrons européens. Si, lorsque les chercheurs espagnols viennent au LURE, c'est bien la France qui paye le coût d'utilisation de la machine, c'est en revanche l'Allemagne qui assume la charge du coût correspondant aux travaux réalisés sur des synchrotrons allemands par des chercheurs français. " *Si des mécanismes rigides de compensation devaient être introduits, cela créerait de la bureaucratie en plus* ".

Analysant au fond des choses les processus de coopération internationale, **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a estimé qu'avec la construction d'un synchrotron anglo-français au terme de discussions serrées entre la France avec le Royaume Uni et le Wellcome Trust, " *on fera reculer de fait la coopération internationale* ".

En effet, alors que le partage des lignes de lumière se sera probablement fait de haute lutte et que le nombre de celles-ci sera inférieur aux besoins de deux pays, on peut redouter que les partenaires anciens de la France, comme l'Espagne au LURE, se voient exclus de DIAMOND, alors qu'ils pouvaient bénéficier auparavant de temps de faisceau.

M. Giorgio MARGARITONDO a jugé qu'effectivement, " *on le craint* ". Il existe en effet actuellement un réseau européen comportant deux ensembles de synchrotrons, ceux du LURE et la source SRS de

Daresbury. On s'attendait que ces deux machines soient remplacées. Or au lieu des deux synchrotrons espérés, il ne pourrait y en avoir qu'un, alors même que la croissance des besoins continue.

M. Jean GALLOT a fait remarquer que, si un accord n'avait pas été signé avec le Royaume Uni, l'énergie du synchrotron français aurait été fixée à 2,5 GeV.

Comme **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, qui a estimé que rien d'irréversible n'a été signé pour le moment entre la France et le Royaume Uni, **M. Jean GALLOT** a noté qu'il existe une possibilité d'échec à ce sujet, si le rapport qualité-prix obtenu n'est pas satisfaisant. Au demeurant, M. Jean GALLOT a rappelé les propos du Professeur Nils MARTENSSON, selon lesquels, s'il devait construire une nouvelle machine aujourd'hui, il choisirait une énergie de 2,5 GeV.

M. Giorgio MARGARITONDO a par ailleurs évoqué la nécessité de considérer les "*conditions aux limites*". Si la France devait construire un seul synchrotron, au surplus sans avoir de "*liaison*" avec d'autres machines, il conviendrait de construire un synchrotron de 2,5 GeV. La position officielle française ayant changé, M. Giorgio MARGARITONDO a indiqué que la Table ronde européenne ne saurait prendre position contre la participation française au projet DIAMOND.

M. Georges CHARPAK a ensuite repris le cas d'une copropriété franco-anglaise de DIAMOND à laquelle s'ajouterait un synchrotron de 1,5 GeV implanté sur le sol français.

Prenant l'hypothèse que la France et le Royaume Uni ne constituent qu'un seul pays, il a demandé à M. Giorgio MARGARITONDO ce qu'il conviendrait de faire, deux machines de 2,4 et 2,4 GeV ou bien une machine de 3 GeV et une machine de 1,5 GeV.

La réponse de **M. Giorgio MARGARITONDO** a été qu'il "*faudrait 3 GeV et 1,5 GeV*".

Sur ce point, **M. Vincent MIKOL** a estimé que tout dépend des communautés et de leurs besoins. Or c'est la biologie structurale qui va évoluer le plus vite. Il a rappelé par ailleurs que les Etats-Unis disposent de 40 lignes de lumière pour la biologie structurale et l'Europe 18 seulement. Pour ces deux raisons, c'est au contraire un synchrotron de 3 GeV qu'il faut construire en France.

M. Georges CHARPAK a alors repris la parole pour indiquer qu'il faut décider la construction d'un autre synchrotron mais "*pas forcément*" au

LURE. En réalité, à l'échelle européenne, " *on peut conclure des accords pour avoir 10 lignes de lumière ou 20 "* de plus que les 7 projetées sur DIAMOND pour la cristallographie à rayons X.

En revanche, on peut espérer que la communauté scientifique européenne se structure autour de la France pour les applications ouvertes par un synchrotron de 1,5 GeV.

M. Giorgio MARGARITONDO a considéré que, s'il existe un déficit en Europe pour les lignes de lumière adaptées à la cristallographie des protéines, le problème est plus général. Dans le cas particulier de la France, si celle-ci a besoin d'accéder à des faisceaux, il lui faut aussi mettre en place un programme cadre plus important pour le soutien des laboratoires.

A l'initiative de **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, un débat s'est alors produit sur les caractéristiques des synchrotrons construits aujourd'hui. **M. Giorgio MARGARITONDO** a confirmé que les machines actuellement en construction n'ont pas une énergie de 1,5 GeV. **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, a relevé que les Etats-Unis, en particulier, ne font pas ce choix.

M. Giorgio MARGARITONDO a ensuite indiqué que l'évolution de Berkeley, où la recherche à haute énergie a augmenté, cause une distorsion dans l'appréciation de la situation. Ainsi, le synchrotron implanté dans le Wisconsin, une machine au demeurant de faible énergie, s'avère très utile et produit de nombreux résultats donnant lieu à publication dans des revues prestigieuses.

Il a également insisté sur la nécessité d'un plan global en faveur de la biologie structurale, comprenant des aides pour la mise au point de méthodes de cristallisation, de techniques d'examen préliminaire des cristaux dès leur formation et de moyens d'étude des protéines membranaires que l'on ne sait pas actuellement cristalliser.

M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, est revenu sur le handicap que subirait l'industrie pharmaceutique nationale si la France ne disposait pas sur son sol de ressources en rayonnement synchrotron dédié à la cristallographie. Au reste, la biologie est sans doute le domaine où le " *frottement* " entre la recherche et l'industrie est le plus fort. Comment accepter que ce qui a été jugé nécessaire en Suisse pour les besoins de l'industrie pharmaceutique locale, à savoir la source SLS de 2,5 GeV, ne le soit pas pour l'industrie pharmaceutique française ?

Sur la question de la source suisse, **M. Giorgio MARGARITONDO** a confirmé qu'à cette occasion, il avait fallu logiquement tenir compte des besoins de l'industrie pharmaceutique suisse, qui n'aurait pas pu se passer d'accès à des faisceaux. Au demeurant, si le synchrotron DIAMOND n'était pas une installation ouverte, "*cela poserait problème*".

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a alors noté qu'il existe un potentiel d'amélioration des lignes de lumière, en particulier avec la robotisation pour la biologie structurale. On peut imaginer de privilégier en France la spectroscopie mais "*il faut entretenir nos compétences*". A cet égard, la position de la Table ronde européenne du rayonnement synchrotron, recommandant la construction de deux nouveaux synchrotrons, prend fidèlement en compte les besoins.

En revanche, la position prise au cours de la présente audition par M. Giorgio MARGARITONDO, sur l'intérêt d'un synchrotron de 1,5 GeV complétant en France l'apport de DIAMOND, ne préviendrait en rien l'apparition d'un "*gros problème*" en Europe pour les faisceaux de haute énergie utilisés en cristallographie.

M. Giorgio MARGARITONDO confirme la prise de position officielle de la Table ronde européenne en faveur de deux nouveaux synchrotrons.

M. Gilles COHEN-TANNOUDJI a alors poursuivi en considérant que ce débat complexe pourrait connaître une évolution importante si l'Union européenne confirmait l'engagement plus fort au service des grands instruments annoncé par M. Vincent COURTILLOT au cours de la présente audition.

Au reste, les problèmes de financement sont du deuxième ordre par rapport à l'enjeu scientifique du rayonnement synchrotron. Il est important, en tout état de cause, que M. Giorgio MARGARITONDO ait confirmé la position de la Fondation européenne de la science, selon laquelle, en l'absence d'un nouveau synchrotron au Royaume Uni et en France, il apparaîtrait un "*manque en France et en Europe*".

Pour terminer, **M. Giorgio MARGARITONDO** a attesté avoir fait parvenir des lettres dans ce sens au Premier ministre, M. Lionel JOSPIN, et au ministre de la recherche, M. Claude ALLEGRE.

Après ces échanges, **M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur**, et **M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur**, ont levé la séance, non sans avoir remercié les participants pour leur contribution.

ANNEXE 2 –

COMPTES RENDUS DES VISITES

1 – Visite des installations du LURE (Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique) – Orsay

– jeudi 27 janvier 2000 *

1. Les points forts et les limites des installations du LURE *
2. Les applications multiples du rayonnement synchrotron au LURE *
 - 2.1. L'étude du magnétisme en coopération avec l'industrie *
 - 2.2. Les études de surface en coopération internationale *
 - 2.3. Les études d'interaction entre la lumière et la matière *
 - 2.4. Les études de diffraction-diffusion *
 - 2.5. Le cas particulier de la biologie 274
 - 2.6. La station d'étalonnage des satellites *
 - 2.7. La ligne dédiée aux microfabrications *
 - 2.8. Une productivité scientifique de haut niveau *
3. Un "*super-laboratoire*" au service de la communauté scientifique et de l'enseignement supérieur et exerçant un effet d'entraînement sur des entreprises de haute technologie *
 - 3.1. Un "*super-laboratoire*" au service de l'ensemble de la communauté scientifique *
 - 3.2. La pénurie de rayonnement synchrotron *

3.3. Le rôle du LURE dans la formation des jeunes chercheurs *

3.4. Les effets d'entraînement du LURE sur l'industrie *

4. Les caractéristiques d'un synchrotron moderne *

4.1. Les avancées techniques des synchrotrons *

4.2. L'énergie optimale d'un synchrotron *

4.2.1. Les contraintes de la basse énergie *

4.2.2. Les conditions de la haute énergie *

4.2.3. L'optimum de 2,5 GeV *

4.2.4. Les raisons des choix faits pour SOLEIL *

4.2.5. L'irréalisme du concept de " machine dédiée " de faible énergie *

4.3. Le passage de DCI et Super-ACO à SOLEIL *

5. Les lasers à électrons libres *

5.1. Le laser à électrons libres à cavité optique *

5.2. L'effet SASE sur des onduleurs *

II – Visite de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) – Grenoble

– vendredi 28 janvier 2000 *

I – Le rayonnement synchrotron : applications actuelles et besoins futurs *

1. Perspectives qualitatives *

1.1. La biologie structurale *

1.2. Les besoins d'automatisation pour la résolution des structures *

- 1.3. Les applications médicales *
- 1.4. Les structures temporelles *
- 1.5. Le cas particulier de la tomographie 3D *
- 1.6. Les autres applications *
- 2. Les besoins quantitatifs *
- 2.1. Les indicateurs à utiliser *
- 2.2. Les prévisions en matière de besoins *

II – Les concurrents des synchrotrons actuels *

- 1. Les mini-synchrotrons *
- 2. La RMN *
- 3. Les lasers à électrons libres et les synchrotrons de 4^{ème} génération *

III – Les effets d'entraînement scientifique et économique des synchrotrons *

- 1. Les effets d'entraînement scientifique *
- 1.1. Les indispensables précautions méthodologiques *
- 1.2. Les synchrotrons, instruments de compétitivité scientifique *
- 1.3. Les synchrotrons, outils de formation des chercheurs *
- 2. Les effets d'entraînement économique *

IV – Un optimum de taille existe-t-il en termes de performances et de coûts ? *

- 1. L'optimum en énergie *
- 1.1. Le rapport Birgeneau *

1.2. Les limites des machines de faible énergie *

2. L'optimum en termes de coûts *

2.1. L'importance du coût des lignes de lumière *

2.2. La nécessité d'évaluations exhaustives *

2.3. Un optimum de 3 GeV *

V – Les propositions de solutions pour la France, présentées par M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF *

1. *"La dépense française en rayonnement synchrotron n'est pas disproportionnée" **

1.1. Des dépenses annuelles par chercheur limitées *

1.2. Des dépenses inférieures à celles des autres pays *

1.3. L'importance de critères de comparaison rigoureux *

2. *"L'inadéquation du scénario de l'achat de lignes sur DIAMOND et sur d'autres synchrotrons européens" **

2.1. Un coût réel supérieur aux estimations actuelles pour les seules lignes sur DIAMOND *

2.2. L'absence de lignes de lumière disponibles ailleurs en Europe *

3. *"L'inadéquation de la solution 7 lignes sur DIAMOND +*

*un synchrotron de 1,5 GeV en France" **

3.1. La répartition des lignes en fonction des disciplines *

3.2. Les inconvénients pour la recherche *

3.3. Une solution ne générant aucune économie par rapport à SOLEIL *

4. " *Une même machine en deux exemplaires, l'une en France et l'autre au Royaume Uni* " *

4.1. Des économies d'échelle considérables *

4.2. Les économies provenant de l'arrêt du LURE assorti du lancement

d'un nouveau synchrotron *

4.3. L'intérêt d'une planification à long terme *

4.4. Inverser les positions dans la négociation *

VI – La forme juridique et le statut des personnels *

1. Le statut juridique de différents synchrotrons *

2. Le statut des personnels de l'ESRF *

2.1. La coexistence de personnels à statuts détachés et de personnels permanents *

2.2. La nécessité d'une grande réactivité *

3. La fiscalité et les charges sociales de la recherche *

VII – La localisation *

1. L'implantation possible sur un site sans synchrotron *

2. L'importance de transports internationaux de qualité *

3. L'importance d'une forte densité en laboratoires de recherche *

VIII – Les coopérations européennes nécessaires *

III – Visite du SRS – Daresbury

– 21 février 2000

Entretiens avec des responsables du Wellcome Trust – Londres

– 21 février 2000

Visite du Rutherford Appleton Laboratory – Didcot

– 22 février 2000 *

1. SRS – Daresbury *

1.1. Une source de 2^{ème} génération de qualité *

1.2. Les prévisions des besoins en rayonnement synchrotron *

1.3. La genèse et les zones d'incertitude de DIAMOND *

1.4. La coopération avec la France, vue par la base *

2. Le Wellcome Trust *

2.1. La puissance du Wellcome Trust dans le financement de la recherche *

2.2. L'implication du Wellcome Trust dans DIAMOND *

3. Le Laboratoire Central des organismes de recherche *

3.1. Un organisme concevant et exploitant les très grands instruments britanniques *

3.2. Le CLRC, une pièce essentielle de la stratégie scientifique britannique ? *

IV – Visite de DESY – Hambourg (Allemagne)

– jeudi 24 février 2000 *

1. Historique et organisation de DESY (Deutsche Elektronen-Synchrotron) *

1.1. Une organisation assurant le développement coordonné de la physique des particules et du rayonnement synchrotron *

1.2. Un ensemble exceptionnel d'accélérateurs et de synchrotrons en synergie les uns avec les autres *

1.3. un centre de formation par la recherche *

2. Le projet TESLA et les perspectives de coopération franco-allemande en physique des particules *

2.1. Les expériences conduites avec l'anneau HERA *

2.2. Le projet TESLA *

2.2.1. La procédure et le calendrier *

2.2.2. Les critères d'évaluation de la recherche en Allemagne *

2.2.3. La coopération internationale *

3. Le rayonnement synchrotron au Hasylab : recherche, service et éducation *

3.1. Un laboratoire de services *

3.2. Une activité en croissance rapide, notamment du fait d'une forte utilisation par les biologistes *

3.2.1. Un nombre d'utilisateurs en forte croissance *

3.2.2. L'envolée de la biologie au HASYLAB *

3.2.3. Les développements prévus et leurs coûts *

3.3. Un centre aujourd'hui saturé ne comportant pas de lignes libres *

3.4. Les caractéristiques idéales d'un synchrotron moderne *

4. Les lasers à électrons libres, futurs compléments des synchrotrons de 3^{ème} génération *

4.1. Le principe de la technologie SASE *

4.2. Le succès du 23 février 2000 *

4.3. Les perspectives d'application des lasers à électrons libres à rayons X, en complément au rayonnement synchrotron *

Conclusion : quel objectif pour la coopération internationale ? *

I – Visite des installations du LURE (Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique) – Orsay – jeudi 27 janvier 2000

Le présent compte-rendu distingue d'une part les informations rassemblées sur le vif lors de la visite des installations du LURE (Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique) et d'autre part les réponses écrites données aux questions posées lors de cette visite. Ces dernières informations, qui exposent la position officielle du LURE, sont présentées en italiques.

1. Les points forts et les limites des installations du LURE

On trouvera ci-après la note préparée à l'intention des Rapporteurs suite à la visite des installations du LURE, le 27 janvier 2000.

" Le LURE possède actuellement quatre accélérateurs :

- Un accélérateur linéaire, le LINAC, d'une longueur de 300 m construit pour la physique des particules dans les années 55-68. C'est l'injecteur des deux anneaux, sources de rayonnement synchrotron, DCI et Super-ACO.*

Le canon fournit des impulsions d'électrons de durée variable (5 ou 20 ns) qui sont accélérés jusqu'à une énergie de 1 GeV dans 16 sections HF de 6 m de long, alimentées par des klystrons de puissance crête 25 MW. Ce faisceau d'électrons frappe une cible et crée des gerbes électrons-positrons. Les positrons sont ensuite accélérés jusqu'à une énergie de 1,1 GeV dans 23 sections HF. Sa fréquence de répétition est de 25 Hz.

- *L'anneau de stockage DCI d'une circonférence de 95 m et d'une énergie maximale de 1,85 GeV. Il a également été construit pour la physique des particules (premier faisceau en 1975). C'est une source dite de 1^{ère} génération. Son domaine d'utilisation est celui des rayons X.*
- *L'anneau de stockage Super-ACO d'une circonférence de 72 m et d'une énergie maximale de 0,8 GeV. Il a été construit pour le rayonnement synchrotron (premier faisceau en 1987) et couvre le domaine VUV-X mous. C'est une source dite de 2^{ème} génération (voir ci-dessous).*
- *Un accélérateur linéaire de 50 MeV élément de base du laser à électrons libres dans l'infrarouge CLIO dont nous ne parlerons pas ici.*

" Les deux anneaux ont une fiabilité supérieure à 90 % et fonctionnent près de 4000 heures par an dont 3500 h pour les utilisateurs avec une vingtaine d'expériences chacune. La puissance nécessaire pour l'ensemble du laboratoire est de 8 MW dont 1,5 MW pour le LINAC injecteur. En pratiquant les injections le plus possible pendant les heures creuses du point de vue de l'électricité, le coût de la consommation électrique pour l'année est de 7,5 MF (HT).

" Pour comprendre l'importance d'une telle installation, il faut revenir sur les principes de la dynamique des particules dans les anneaux de stockage.

" Une impulsion de positrons est injectée dans une chambre à vide et suit un chemin formé d'arcs de cercles, déterminés par le champ magnétique des dipôles qui courbent leur trajectoire, et de segments rectilignes. D'autres éléments magnétiques appelés quadripôles focalisent les particules de sorte qu'elles exécutent des oscillations transverses stables autour de cette trajectoire dite de référence.

" A chaque passage dans les dipôles les particules émettent un rayonnement appelé rayonnement synchrotron. L'énergie perdue doit être compensée par un champ électrique oscillant dans une cavité radiofréquence (RF) dont la fréquence est un multiple de la fréquence de rotation des particules dans l'anneau (25 MHz pour DCI et 100 MHz pour Super-ACO). Pour chaque période d'oscillation RF il y a une valeur de la tension qui correspond à la compensation exacte de l'énergie perdue, c'est un point stable autour duquel se forment des paquets dans lesquels les particules oscillent en position longitudinale et en énergie. Il peut y avoir autant de paquets que le rapport entre la fréquence RF et la

fréquence de rotation des particules (huit paquets dans DCI et 24 dans Super-ACO).

" Les faisceaux n'ont pas une durée de vie infinie : les particules peuvent être perdues par collision avec les molécules de gaz résiduel (bien que la pression soit très faible : 10^{-13} atmosphères) ou entre particules d'un même paquet (le nombre de collisions est d'autant plus important que les dimensions transverses sont petites et que l'énergie de la machine est faible). Pour injecter et accumuler les particules, il faut disposer d'un ensemble d'éléments pulsés à 25 Hz qui déforment l'orbite de référence de façon à ce que l'impulsion injectée qui oscille autour de cette orbite garde une amplitude faible. L'orbite est ramenée au centre après quelques tours.

" Au total, un grand nombre de techniques sont mises en jeu, ce qui nécessite des équipes relativement importantes et compétentes.

" Les principales caractéristiques du rayonnement émis sont indiquées ci-dessous.

" Le rayonnement d'un dipôle se fait suivant un spectre continu de l'infrarouge jusqu'aux rayons X. Le flux du rayonnement, c'est-à-dire le nombre de photons émis par seconde à l'intérieur d'une bande de fréquence donnée croît linéairement à partir des faibles énergies de photons jusqu'à une valeur proche de l'énergie " critique " et décroît ensuite exponentiellement. Cette énergie " critique " est celle qui partage le spectre en deux parties d'égale puissance rayonnée, elle est directement proportionnelle au champ magnétique des dipôles et au carré de l'énergie de la machine ($\varepsilon_c = 0.665 B \cdot E^2$ soit 4keV pour DCI et 670 eV pour Super-ACO). Plutôt que le flux seul, la caractéristique d'une source est aussi sa concentration, on parlera donc de sa brillance, qui est obtenue en divisant le flux par l'émittance (produit de l'angle d'émission par la dimension de la source). Pour augmenter le rayonnement émis, les chercheurs ont eu l'idée d'installer dans les sections droites des insertions appelées onduleurs constitués d'un arrangement de dipôles qui courbent alternativement la trajectoire suivant une sinusoïde. On a alors un phénomène d'interférences constructives pour certaines énergies de photons entre les ondes émises à chacune des parties courbes de la trajectoire. De plus, l'angle d'émission est d'autant plus réduit qu'il y a un grand nombre d'oscillations de la trajectoire. Le gain en brillance obtenu est alors de 2 à 4 ordres de grandeur. L'énergie des photons est déterminée par l'énergie de la machine mais également par la période (plus la période est petite, plus l'énergie des photons est élevée) et le champ des onduleurs. On peut donc pour une même énergie de machine couvrir

une gamme d'énergie de photons extrêmement grande avec des onduleurs de périodes différentes. Notons que l'on peut aussi installer un wiggler, c'est-à-dire une insertion avec un champ très supérieur à celui des dipôles qui déplace l'énergie critique vers des énergies plus élevées. Il existe 6 onduleurs sur Super-ACO et un wiggler sur DCI.

" Les différents modes de fonctionnement demandés par les utilisateurs sont les suivants :

- Mode multipaquets. Tous les paquets possibles sont remplis afin d'obtenir le flux maximum.*
- Mode structure temporelle pour étudier les phénomènes dynamiques. Ce mode nécessite peu de paquets séparés par un temps relativement long. Pour conserver un flux suffisant, il faut alors augmenter le nombre des particules par paquets ce qui augmente la possibilité de collisions entre particules d'un même paquet et fait donc chuter la durée de vie. Les demandeurs de structure temporelle sont ceux qui travaillent à une faible énergie de photons.*

" Les performances les importantes d'un synchrotron sont la brillance et la durée de vie des faisceaux.

" Sur DCI, construit pour la physique des particules, l'émittance est très grande donc la brillance est faible. Par contre, la durée de vie est très grande (220 h) pour un courant de 320 mA. On a besoin d'une seule injection par semaine.

" Sur Super-ACO, l'émittance est plus petite, donc la brillance est plus grande, mais comme l'énergie de la machine est basse (0,8 GeV), la durée de vie est faible (12 h avec 24 paquets et 400 mA et 6 h avec 2 paquets et 200 mA). En effet, la durée de vie croît comme le carré de l'énergie pour les collisions sur le gaz résiduel et suivant une puissance supérieure à 2,5 pour les collisions entre particules.

" Pour avoir à la fois des performances en brillance et en durée de vie, on a donc tout intérêt à avoir une énergie de machine suffisamment élevée pour garantir une bonne durée de vie ($E > 2$ GeV) et optimiser les périodes des onduleurs pour couvrir le spectre désiré. C'est ce que nous avons fait pour SOLEIL avec l'énergie optimum de 2,5 GeV où l'on peut couvrir de 10 eV (VUV) à 15 keV voire 20 keV(X durs) avec une durée de vie de 20 h en multipaquets et autant pour la structure temporelle.

" SOLEIL a comme objectif les performances ultimes des sources de 3^{ème} génération : Très haute brillance (4 ordres de grandeur supérieure à celle de Super-ACO) car très faible émittance et grandes sections droites pour l'installation d'onduleurs ayant un grand nombre de périodes ".

Le synchrotron DCI se caractérise par des faisceaux dont l'émittance est relativement grande, c'est-à-dire des faisceaux peu fins d'une durée de vie relativement élevée. Au contraire, Super-ACO travaille avec des faisceaux plus fins dont la durée de vie est plus faible.

Super-ACO comprend 8 sections droites, dont 2 prises pour le fonctionnement de la machine, et 6 dotées d'onduleurs.

L'un des inconvénients de l'âge des installations du LURE est leur consommation importante d'électricité. Le lancement de la machine, qui se traduit par l'injection des électrons nécessite une puissance de 7 à 8 MW pendant une heure, avec la mise en œuvre de 39 sections accélératrices. Une telle consommation oblige à choisir les horaires correspondant aux tarifs les moins onéreux, ce qui justifie, au moins en partie, l'arrêt prolongé des installations en hiver.

2. Les applications multiples du rayonnement synchrotron au LURE

L'analyse des projets du LURE montre que l'éventail des expériences réalisées est très large et met en œuvre des techniques très différentes, au service de domaines très diversifiés. En voici quelques exemples.

2.1. L'étude du magnétisme en coopération avec l'industrie

L'une des lignes de lumière du LURE est consacrée à l'étude du magnétisme en utilisant la polarisation du rayonnement synchrotron. Cette ligne a été construite en coopération avec 3 régions, l'Alsace pour le compte de l'université de Strasbourg, la Lorraine pour l'université de Nancy, la Bourgogne pour l'université de Nancy. Le coût de construction de cette ligne s'est élevé à 13 millions de francs, dont 5 pris en charge par les trois régions précitées.

Le magnétisme est l'un des domaines de l'analyse de la matière où le rayonnement synchrotron est venu concurrencer une autre méthode d'analyse, à savoir les sources de neutrons, grâce à sa capacité à mesurer des quantités très limitées de moment magnétique.

La compréhension des mécanismes intervenant dans l'orientation des moments magnétiques, par exemple couchée ou debout, des substrats ou des couches superposées, a pour but d'augmenter toujours plus la densité de stockage de l'information sur des supports magnétiques.

La ligne de lumière consacrée au magnétisme au LURE est mise à contribution pour des travaux conduits en partenariat avec l'industrie, IBM, Alcatel ou Thomson, par exemple.

Le LURE a développé des appareillages qui permettent d'opérer à des températures très basses et qui, n'ayant pour seuls rivaux que les dispositifs de Berkeley, ont été achetés par l'Italie pour la source ELETTRA de Trieste.

2.2. Les études de surface en coopération internationale

Deux lignes de lumière sur onduleur du LURE résultent d'une coopération franco-suisse pour l'une et franco-espagnole pour l'autre. La participation espagnole dans cette dernière qui date de 1996, atteint 60 %, le complément étant assuré par la France. La coopération franco-espagnole a débuté en 1991 et a pour résultat aujourd'hui que l'Espagne veut développer des communautés d'utilisateurs de rayonnement synchrotron, en particulier dans le domaine des études de surface.

2.3. Les études d'interaction entre la lumière et la matière

Le LURE a développé une ligne de spectroscopie V-UV de haute résolution à haut flux et à polarisation variable. Cette ligne exploite la caractéristique très utile du rayonnement synchrotron d'être pulsé. La polarisation variable est une méthode où le LURE est en avance sur le monde entier.

Le haut flux du rayonnement synchrotron permet l'étude d'espèces diluées, de molécules refroidies, d'agrégats métalliques ou d'espèces excitées préalablement par laser.

C'est le LURE qui a mis au point le premier onduleur croisé au monde. Au demeurant, le concept de cette ligne de haut flux est exportable, y compris sur SOLEIL.

2.4. Les études de diffraction-diffusion et de spectroscopie d'absorption X en sciences des matériaux

Les études de diffraction-diffusion et de spectroscopie d'absorption X représentent, en moyenne au LURE, près de 400 projets par an, soit environ la moitié du total.

Les études faites avec ces techniques portent par exemple sur les transformations de phase, les catalyseurs, les semi-conducteurs, les cristaux liquides, les structures artificielles, les alliages métalliques et les matériaux étudiés dans le cadre des sciences de la terre.

Au reste, la spectroscopie d'absorption de rayons X n'est possible qu'avec un synchrotron. C'est au LURE qu'a été établi pour la première fois un faisceau de rayons X d'une finesse de 1 μm .

Une ligne permettant l'utilisation de ces méthodes à haute température a été financée en grande partie par la région Centre, dans le cadre du dernier contrat de plan Etat-Région.

Ces techniques sont également utilisées au LURE pour effectuer des expériences en conditions extrêmes de température et de pression. Les applications principales sont la géophysique, les études de dichroïsme magnétique et la résistance des alliages à la corrosion.

Une autre ligne dite "*chaude*", spécialement aménagée pour permettre l'analyse d'échantillons radioactifs, assure quelques 36 % de la demande de DCI. Les principales expérimentations concernent la séparation poussée des actinides avec notamment la mesure des paramètres structuraux de molécules permettant leur séparation poussée.

2.5. Le cas particulier de la biologie

Les manipulations relatives à la biologie représentent 20 % du total de l'activité du LURE. L'une des évolutions marquantes prévues pour SOLEIL dans ce domaine porte sur la réduction considérable de la durée des manipulations, avec un temps d'acquisition des données de cristallographie passant d'une vingtaine de minutes à quelques secondes, ce qui augmentera considérablement le nombre de projets accueillis.

La compréhension des fonctions des protéines constitue un enjeu majeur de la biologie contemporaine. Le rayonnement synchrotron est

en première ligne dans la mesure où la connaissance de la structure d'une protéine apporte des informations de première importance sur la compréhension de sa fonction. L'analyse informatique par transformée de Fourier de la centaine de clichés de diffraction pris pour un cristal de protéine livre ainsi sa structure atomique.

Mais les besoins de la biologie en rayonnement synchrotron ne se résument pas à l'analyse des structures par diffraction des rayons X. Des études spectroscopiques par déclin de fluorescence dans le visible et l'ultraviolet permettent d'aborder les études de la dynamique, des modifications chimiques et de la réactivité des macromolécules biologiques, avec des échelles de temps complémentaires de celles de la RMN.

En tout état de cause, SOLEIL permettra de répondre à l'ensemble de ses besoins. Certes, ce nouveau synchrotron ne produira pas de longueurs d'onde de 0,5 Å mais fournira des faisceaux d'excellente qualité pour des longueurs d'onde de l'ordre de 1 Å ou plus, qui constituent la masse des demandes en biologie.

2.6. La station d'étalonnage des satellites

Les trois satellites EIT (infra rouge), SOHO (étude du Soleil), XMM (observation rayons X), ont eu leurs détecteurs étalonnés dans la station spécifique du LURE d'étalonnage au moyen du rayonnement synchrotron.

2.7. La ligne dédiée aux microfabrications

Le rayonnement synchrotron peut être utilisé en micro-fabrication avec la technique de lithographie rayons X. Les précisions atteintes sont de l'ordre du micron (10^{-6} m) mais ces techniques peuvent également être utilisées pour des fabrications de l'ordre du mm.

Un des enjeux actuels des techniques de micro-fabrication est la combinaison des microtechnologies en trois dimensions utilisées pour la fabrication des microsystèmes et des nanotechnologies planaires de la microélectronique, pour parvenir à un mode de fabrication complet et homogène.

2.8. Une productivité scientifique de haut niveau

Le nombre de publications scientifiques issues des travaux du LURE est l'ordre de 400 par an. Il est difficile de le recenser de manière

exhaustive, dans la mesure où le LURE n'oblige pas ses utilisateurs à citer sa contribution.

Selon le rapport Birgeneau, le nombre de publications du LURE dans des revues de haut niveau comme Nature, Science et Physical Review Letters est toutefois de l'ordre de 12 par an, un chiffre comparable à ceux des synchrotrons de Stanford et Brookhaven, les différences de taille des installations étant prises en compte.

On trouvera ci-après un extrait de la note préparée par le LURE à l'intention des Rapporteurs, suite à leur visite des installations le 27 janvier 2000.

" Publications relatives aux expériences effectuées au LURE

En 1997 = 412 références

En 1998 = 398 références

publiées par les chercheurs du LURE permanents, associés et utilisateurs extérieurs.

En 1999 = 231 références

publiées par les chercheurs du LURE permanents et associés

(les publications 1999 des utilisateurs extérieurs ne sont pas collectées à ce jour).

" Sont portées en annexe les publications parues dans les revues Nature, Physical Review Letters et Science de 1995 à 2000.

" Le nombre des publications dans ces revues est comparable à celui des centres de rayonnement synchrotron aux Etats-Unis (source : rapport "Birgeneau") si l'on prend en compte la taille respective des différents laboratoires.

" La participation des chercheurs du LURE à des Conférences "invité" s'élève à 42 en 1997 et à 52 en 1998. "

3. Un " super-laboratoire " au service de la communauté scientifique et de l'enseignement supérieur et exerçant un effet d'entraînement sur des entreprises de haute technologie

3.1. Un " super-laboratoire " au service de l'ensemble de la communauté scientifique

La technicité des installations DCI et Super-ACO nécessite la présence d'un personnel hautement qualifié autour de celles-ci. Pour autant ces installations ne sauraient se résumer à la production de rayonnement synchrotron et les scientifiques du LURE à des concepteurs ou à des gestionnaires de synchrotrons. Les accélérateurs et les anneaux de stockage ne seraient rien, en effet, sans les lignes de lumière et leur instrumentation qui mettent en œuvre un ensemble considérable de méthodes expérimentales diversifiées.

De même, la communauté scientifique du LURE rassemble non seulement des spécialistes des machines mais aussi des chercheurs de toutes disciplines qui mettent au point sur les installations du LURE des méthodes expérimentales et les utilisent pour leurs propres recherches.

En outre, le LURE accueille sur ses installations un nombre considérable de chercheurs visiteurs qui viennent bénéficier des performances extraordinaires du rayonnement synchrotron. Ces chercheurs proviennent de toutes les régions françaises mais aussi de l'étranger.

On trouvera dans la suite les statistiques communiquées par le LURE.

" Les tableaux suivants montrent l'origine régionale ou nationale des projets 'demandés et accordés' depuis 1998.

" La répartition géographique des projets déposés et accordés est compilée pour les années 1998, 1999 et 2000. En tenant compte du fait que chaque projet accordé implique 2 missions prises en charge par LURE, on peut estimer le nombre minimum d'utilisateurs au double de celui des projets accordés. "

Tableau 1 : Nombre de projets demandés au LURE et accordés par région

en 1998

Régions	Nbre de projets demandés	Nbre de projets accordés	Nbre de runs demandés	Nbre de runs accordés
Alsace	29	24	236	152
Aquitaine	6	6	25	15
Auvergne	2	1	10	2
Basse Normandie	8	5	78	28
Bourgogne	3	3	13	13
Bretagne	5	3	50	26
Centre	13	7	60	21
Franche Comté	2	2	15	10
Haute Normandie	1	1	4	3
Ile-de-France (hors LURE)	229	200	1 953	1 273
LURE	117	105	1 299	861
Languedoc-Roussillon	16	14	77	54
Lorraine	17	17	102	66
Midi-Pyrénées	12	11	70	39
Nord Pas-de-Calais	1	0	3	0
Pays de la Loire	6	5	28	20
Picardie	2	1	23	17
Poitou Charentes	4	4	21	18

Provence Côte d'Azur	20	18	122	90
Rhône Alpes	55	48	393	274
TOTAL	548	474	4 582	2 982

Tableau 2 : Origine géographique résumée des projets du LURE en 1998

	Projets demandés	Projets accordés	Runs demandés	Runs accordés
Paris + sa région	229	200	1 953	1 273
LURE	117	105	1 299	861
Province	202	169	1 330	848
C.E.	142	99	1 065	547
Etranger + Pays de l'Est	40	29	279	170
TOTAL	730	602	5 926	3 699

Tableau 3 : Nombre de projets demandés au LURE et accordés par région

en 1999

Régions	Nbre de projets demandé	Nbre de projets accordé	Nbre de runs demandé	Nbre de runs accordé
----------------	--	--	-------------------------------------	-------------------------------------

	s	s	s	s
Alsace	27	22	190	123
Aquitaine	3	1	12	3
Auvergne	3	2	25	5
Basse Normandie	6	4	64	19
Bourgogne	7	5	27	16
Bretagne	5	4	41	28
Centre	7	6	25	17
Champagne	2	1	4	1
Franche Comté	2	1	15	7
Haute Normandie	1	1	4	4
Ile-de-France (hors LURE)	250	212	2 031	1 384
LURE	118	99	1 362	878
Languedoc-Roussillon	24	20	136	96
Lorraine	12	12	63	62
Midi-Pyrénées	12	11	64	41
Nord Pas-de-Calais	3	3	8	6
Pays de la Loire	12	10	45	35
Picardie	3	3	24	24
Poitou Charentes	9	8	42	32
Provence	30	23	219	117

Côte d'Azur				
Rhône Alpes	47	38	427	194
TOTAL	583	486	4 828	3 092

Tableau 4 : Origine géographique résumée des projets du LURE en 1999

	Projets demandés	Projets accordés	Runs demandés	Runs accordés
Paris + sa région	250	212	2 031	1 384
LURE	118	99	1 362	878
Province	215	175	1 441	836
C.E.	144	110	1 098	605
Etranger + Pays de l'Est	54	42	457	246
TOTAL	781	638	6 383	3 943

Tableau 5 : Nombre de projets demandés au LURE par région pour 2000

Régions	Nbre de projets demandés	Nbre de runs demandés
Alsace	22	218
Aquitaine	9	55

Auvergne	3	19
Basse Normandie	4	34
Bourgogne	4	24
Bretagne	4	50
Centre	7	55
Franche Comté	2	25
Haute Normandie	3	24
Ile-de-France (hors LURE)	240	1 975
LURE	79	1 049
Languedoc- Roussillon	13	103
Lorraine	11	70
Midi-Pyrénées	9	44
Nord Pas-de- Calais	5	29
Pays de la Loire	18	82
Picardie	3	13
Poitou Charentes	4	38
Provence Côte d'Azur	21	155
Rhône Alpes	44	333
TOTAL	505	4 395

Tableau 6 : Origine géographique résumée des projets du LURE en 2000

	Projets demandés	Runs demandés
Paris + sa région	240	1 975

LURE	79	1 049
Province	186	1 371
C.E.	142	1 244
Etranger + Pays de l'Est	51	362
TOTAL	698	6 001

3.2. La pénurie de rayonnement synchrotron

L'analyse des données précédentes fournies par le LURE à la demande du groupe de travail formé par les Rapporteurs conduit à deux conclusions majeures.

La première est que le LURE, en raison de capacités insuffisantes, ne peut satisfaire qu'en moyenne 62 % des demandes d'accès à ses installations. Le pourcentage est un peu plus élevé pour les demandes françaises (64,5 % environ) que pour les demandes étrangères (67 % en 1998 mais 55 % en 1999).

Tableau 7 : L'excédent des demandes d'accès au LURE par rapport aux ressources disponibles

	1998		1999	
	nombre de runs	%	nbre de runs	%
1. Runs demandés				
total	5926		6383	-
France	4582		4828	-
étranger	1065		1555	-
2. Runs accordés				
total	3699	62,4	3943	61,8
France	2982	65,1	3092	64,0
étranger	717	67,3	851	54,7

L'autre conclusion est que cette pénurie est accentuée par l'ouverture internationale du LURE, une ouverture indispensable en tout état de cause dans la recherche moderne et dans le cadre du fonctionnement normal des synchrotrons dans le monde.

Au demeurant, en 1999, les accès accordés à des équipes étrangères ont représenté 851 runs, soit 18 % de la demande française. Il faut bien constater que l'indispensable ouverture internationale accroît encore la pénurie pour les chercheurs français.

3.3. Le rôle du LURE dans la formation des jeunes chercheurs

Les installations du LURE sont, comme dans d'autres pays, un outil de formation à la recherche, d'une importance considérable.

On trouvera ci-dessous la réponse aux questions des Rapporteurs, préparée par le LURE suite à la visite des installations en date du 27 janvier 2000.

" Le LURE est le siège de deux DEA :

- Physique et Technologie des Grands Instruments (commun à Paris VI, Paris VII, Paris VIII, Paris XI, école Polytechnique et Université de Versailles-Saint Quentin)*
- Cristallographie et RMN biologique (DEA national commun à Paris XI-Orsay, Joseph Fourier-Grenoble et Louis Pasteur-Strasbourg).*

" Une partie des cours de chaque DEA et des travaux pratiques du second DEA s'effectuent dans les locaux du LURE, ce qui facilite les contacts entre chercheurs et étudiants. Des membres du laboratoire participent à l'enseignement de ces DEA.

" Le laboratoire abrite également les cours de l'option "Chimie à l'aide du Rayonnement synchrotron" des DEA Chimie Inorganique (Paris VI) et Physico-chimie Moléculaire (Paris Sud). Les cours sont assurés par des chercheurs du Laboratoire.

" Par ailleurs, le laboratoire est Laboratoire d'accueil des écoles doctorales suivantes :

- *Interface Chimie-Biologie (Université Paris Sud) jusqu'en 1999 puis : Innovation Thérapeutique, du Fondamental à l'Appliqué.*

- *Rayonnements et Environnement (Université Paris Sud)*

Ondes et Matière (Paris Sud)

Physique de la Région parisienne (Ecole Normale Ulm)

Sciences Fondamentales (Clermont-Ferrand)

et le DEA Physique expérimentale des Atomes et Applications (Paris VI)

" Depuis 10 ans, le LURE chaque année reçoit les soixante doctorants de la formation doctorale européenne HERCULES pour des stages expérimentaux de plusieurs jours, répartis sur les différentes lignes de lumière. De plus, plusieurs chercheurs du LURE participent à cet enseignement.

" Accueil de doctorants au laboratoire :

" Sur les années 98-99-2000, 38 doctorants effectuent ou viennent de terminer leur thèse au laboratoire. La communauté européenne est bien représentée car, sur ces 38 doctorants, 26 sont français, 9 européens (italiens, espagnols, roumains, allemands), 2 brésiliens et un algérien. Les doctorants se répartissent dans les différentes sections du laboratoire, avec le plus grand nombre de doctorants dans la section biologie (13).

" Doctorants associés à des projets d'autres laboratoires :

" Sur les propositions d'expériences, il est indiqué si cette expérience se place dans le cadre de la thèse d'un doctorant ; on peut dénombrer :

- en 1998 : 418 doctorants impliqués

- en 1999 : 386 doctorants

- en 2000 : 330 doctorants

" Accueil de stagiaires : *Chaque année une quarantaine de stagiaires de licence, maîtrise et DEA sont accueillis :*

- Année scolaire 97-98 : 13 étudiants de licences, 17 de maîtrises, 10 de DEA

- Année scolaire 98-99 : 15 étudiants de licences, 11 de maîtrises, 12 de DEA ".

3.4. Les effets d'entraînement du LURE sur l'industrie

Une installation comme le LURE est en maintenance permanente et fait l'objet d'améliorations constantes. Il en résulte des relations proches avec différentes entreprises de haute technologie qui bénéficient de transferts de connaissances et de savoir-faire de haut niveau. Par ailleurs, le passage incessant de chercheurs visiteurs génère une activité d'accueil et porte la notoriété des entreprises partenaires bien au-delà de la région.

On trouvera ci-après les informations présentées par le LURE, à la suite de la visite des Rapporteurs sur ces sujets.

" Les interactions sont multiples entre un centre national de rayonnement synchrotron tel que LURE et le tissu économique spécialement régional mais aussi national.

" D'abord, la nature et l'ampleur des programmes de recherche utilisant le rayonnement synchrotron sont telles qu'il doit être fait appel, pour la réalisation des ensembles expérimentaux nécessaires, à de très nombreuses PME ou PMI spécialisées en mécanique de précision, techniques du vide, électronique, optique, informatique. Pour exemple, nous pouvons citer la collaboration que LURE entretient avec une société comme Jobin-Yvon dans le domaine de l'optique des lignes de lumière. Le développement en commun de procédures et de systèmes de contrôles a permis d'augmenter d'un facteur 5 la qualité des surfaces optiques et par la même les résolutions ultimes des monochromateurs à réseau. Le LURE sert de vitrine à Jobin-Yvon pour la vente de systèmes optiques dans le domaine du rayonnement synchrotron et contribue donc à placer cette société dans le peloton de tête au niveau international.

" Dans le domaine de la haute technologie touchant les machines, de nombreux exemples existent à la fois dans le transfert de technologie et dans les commandes de matériels vers des PME-PMI voir des multinationales :

- techniques de soudure et de façonnage sur des boîtes à vide (SEIV-Plasmion) ;
- aide au développement de mesures magnétiques (Brucker) ;
- réalisation de céramiques de grandes dimensions pour les aimants perturbateurs ;
- développement de klystrons de très grande puissance (Thomson) ;
- achat de matériel hyperfréquence (pilote très haute stabilité, fenêtre haute puissance) ;
- développement de canons à électrons de fort courant ;
- construction en collaboration d'un nouveau type d'onduleur électromagnétique croisé (Sigma-Phi).

" Si l'on se place en volume annuel d'achat par exemple :

- 2,5 MF/an sont dépensés pour la partie injecteur des machines en direction de l'industrie française.
- Le développement et la réalisation de l'optique d'une ligne de lumière dans le cadre de notre dernier plan d'équipement instrumental a entraîné sur deux ans la passation de 250 commandes à 110 sociétés différentes pour un total de l'ordre de 7 MF.

" Dans les tableaux 1 et 2, nous rappelons, pour l'année 1995 et l'année 1999, le nombre et l'origine géographique des entreprises avec lesquelles LURE a interagi. Sur ces deux années prises en exemple, on voit que c'est un total de 800 entreprises dont LURE a besoin par an et qui donc bénéficient de son activité. Parmi celles-ci, plus de 70% sont situées dans la région Ile-de-France, représentant environ 90% d'un chiffre annuel de commandes de l'ordre de 40 MF. D'autre part, la présence permanente dans la région d'environ 400 salariés à revenu relativement élevé apporte un soutien réel à l'activité économique locale.

" Enfin, la venue d'environ 2000 chercheurs, français et étrangers, chaque année, pour réaliser à LURE un projet s'étendant sur une certaine période de temps contribue également à soutenir l'activité économique des entreprises de service et d'hôtellerie.

Tableau 8 : Détail des commandes 1995 du LURE par localisation des fournisseurs

Départements	Entreprises Nombre %	Montant des commandes
---------------------	---------------------------------	----------------------------------

				en MF en %	
75	Paris	115	12,9	3,53	10,8
77	Seine et Marne	30	3,3	1,01	3,1
78	Yvelines	87	9,7	4,70	14,4
91	Essonne	192	21,5	12,17	37,2
92	Hauts-de-Seine	135	15,1	4,00	12,2
93	Seine-Saint-Denis	63	7,1	1,20	3,7
94	Val-de-Marne	71	8	1,89	5,8
95	Val d'Oise	39	4,4	0,85	2,6
Total pour l'Île de France		732	82,1	29,35	89,8
Province		160	17,9	3,33	10,2
TOTAL GENERAL		892	100	32,68	100

Tableau 9 : Détail des commandes 1999 du LURE par localisation des fournisseurs

Départements		Entreprises Nombre %		Montant des commandes en MF en %	
75	Paris	84	10,95	3,08	7,54
77	Seine et Marne	21	2,74	0,34	0,82
78	Yvelines	71	9,26	2,70	6,6
91	Essonne	187	24,38	22,44	54,9
92	Hauts-de-Seine	86	11,21	4,38	10,72

93	<i>Seine-Saint-Denis</i>	42	5,48	1,40	3,42
94	<i>Val-de-Marne</i>	44	5,74	1,33	3,26
95	<i>Val d'Oise</i>	27	3,52	0,42	1,03
	Total pour l'Île de France	562	73,27	36,09	88,29
	<i>Province</i>	139	18,12	3,56	8,71
	<i>Etranger CEE</i>	38	4,95	0,65	1,6
	<i>Etranger hors CEE</i>	28	3,65	0,57	1,4
	Total Etranger	66	8,6	1,22	3
	TOTAL GENERAL	767	100	40,87	100

4. Les caractéristiques d'un synchrotron moderne

Le LURE est depuis l'origine un centre de compétence dans les accélérateurs et les synchrotrons, puisque c'est grâce à ses équipes de physiciens des particules, d'ingénieurs et de techniciens que le rayonnement synchrotron a fait l'objet des premières applications en France.

Au cours de la visite des rapporteurs, de nombreuses questions relatives aux caractéristiques techniques de DCI et de Super-ACO ont été posées, ainsi que sur les caractéristiques des synchrotrons modernes.

4.1. Les avancées techniques des synchrotrons

Les dispositifs d'insertion permettent de gagner au minimum deux ordres de grandeur, c'est-à-dire un facteur 100 par rapport aux classiques dipôles de courbure.

Les aimants supraconducteurs sont mis en œuvre dans les wigglers et, s'ils présentent l'avantage de produire des champs magnétiques intenses, ils ont comme inconvénient de ne pas permettre d'en faire varier facilement l'intensité et d'entraîner des émittances supérieures à celle des onduleurs.

Les onduleurs sont constitués d'aimants permanents alternés qui permettent des oscillations rapides des électrons et introduisent des résonances pour certaines longueurs d'onde. On aboutit donc à une concentration des émissions dans certaines longueurs d'onde. Au surplus, les onduleurs délivrent des ondes en nappes planes et des faisceaux presque parallèles d'une brillance extrême.

La nouvelle génération d'onduleurs correspond aux onduleurs sous vide, qui permettent d'atteindre des brillances très élevées dans le domaine des rayons X, même avec des machines d'énergie intermédiaire.

Aujourd'hui, les 2/3 des applications du rayonnement synchrotron utilisent des rayons X. Il faut donc une machine nationale dans ce domaine.

Encadré I

Les éléments d'insertion d'un anneau synchrotron.

Rappelons que dans un anneau de stockage les aimants de courbure servent à boucler la trajectoire. Ces aimants constituent également des sources de rayonnement synchrotron de brillance moyenne et à spectre d'émission continu. Toutefois, dans le cas des anneaux de 3^{ème} génération, le véritable enjeu scientifique est constitué par les onduleurs, des structures magnétiques périodiques insérées dans les sections droites de l'anneau. Les rayonnements synchrotron émis successivement par un électron donné lors de sa traversée de l'onduleur interfèrent entre eux. Il en résulte que la divergence du faisceau est réduite et que l'émission est concentrée dans des bandes spectrales étroites centrées à une longueur d'onde fondamentale λ et ses harmoniques λ/n (n impair). D'où une brillance très élevée et des optiques relativement simples (faible ouverture, charge thermique limitée). On a la relation suivante :

$\lambda \propto \lambda_0 / \gamma^2$, où λ_0 est la période magnétique. Une source de rayonnement synchrotron optimale pour une application donnée est obtenue en choisissant la période magnétique et l'entrefer (qui doit être de l'ordre de $\lambda_0/3$) ainsi que l'harmonique de l'onduleur. On sait maintenant

fabriquer des onduleurs produisant du rayonnement X de longueur d'onde 1 Å sur un anneau de 3ème génération d'énergie intermédiaire. Ces onduleurs, à période courte et entrefer étroit (quelques mm), sont installés dans le vide de la chambre de l'anneau. La technologie est maintenant parfaitement maîtrisée et permet l'installation d'onduleurs X sur les anneaux d'énergie au moins égale à 2,4 GeV (ex : SLS à Villingen).

Encadré I (suite et fin)

Les éléments d'insertion d'un anneau synchrotron

Le wiggler multipôles est un autre type d'élément d'insertion. Il s'agit d'une structure constituée de plusieurs aimants alignés dont le champ magnétique est en général plus élevé que celui des aimants de courbure. L'émission synchrotron est ainsi décalée vers les courtes longueurs d'onde et l'intensité totale est proportionnelle au nombre d'aimants. Les wigglers permettent d'obtenir des rayons X avec des machines de 3ème génération dont l'énergie est trop basse pour l'installation d'onduleurs X (par exemple ALS, Bessy II, Elettra, Max II). Par rapport aux onduleurs X, les wigglers ont plusieurs défauts : leur faisceau a une divergence plus grande et une brillance plus faible ; la puissance des faisceaux est plus élevée puisque le spectre d'émission est continu ; la conception des optiques à large ouverture est en conséquence plus complexe, avec des problèmes de refroidissement et de dégradation accrus.

4.2. L'énergie optimale d'un synchrotron

Les électrons tournant dans l'anneau de stockage subissent une déperdition due, d'une part, aux chocs avec les traces de gaz présentes dans l'anneau malgré le vide de 10^{-9} hPa qui y règne, et, d'autre part, aux oscillations transverses existant dans le paquet d'électrons.

Plus l'énergie de la machine est élevée et plus la durée de vie des électrons est élevée. En outre, une énergie élevée permet d'utiliser des

onduleurs de grande période qui permettent d'avoir une brillance supérieure.

Une finesse accrue des faisceaux augmente les risques de collisions entre les électrons et donc diminue leur durée de vie.

Le synchrotron ALS de Berkeley a vu son énergie portée de 1,5 à 1,9 GeV. L'un des inconvénients de sa configuration initiale était la durée de vie limitée à 1 heure de ses faisceaux, à comparer à celle de 20 h prévue pour SOLEIL.

Tels sont quelques-uns des paramètres critiques des synchrotrons.

Au reste, si l'objectif est de construire un synchrotron polyvalent, il s'agit de déterminer une zone de fonctionnement optimal à la fois pour la production de photons de basse énergie et de photons de haute énergie. Si une telle démarche est délicate, elle est néanmoins possible, comme l'a amplement démontré l'avant-projet détaillé SOLEIL.

4.2.1. Les contraintes de la basse énergie

Le premier facteur influençant la durée de vie des électrons est leur interaction avec les noyaux de l'air résiduel. Cette interaction varie comme l'inverse du carré de l'énergie ($1/E^2$). Logiquement, plus l'énergie des électrons est forte et moins gênants sont les obstacles que représentent ces molécules d'air résiduel.

Un autre effet influe sur la durée de vie des électrons, l'effet Touschek qui désigne les interactions des électrons eux-mêmes dans le paquet qu'ils constituent. Cet effet est dominant par rapport aux précédents pour les faisceaux de haute brillance et de faible émittance qui caractérisent les synchrotrons de 3^{ème} génération. Cet effet est fonction du carré de l'énergie (E^2), de l'inverse de la densité des électrons ($1/\rho$) dans le paquet et du cube de l'écart relatif moyen en énergie des électrons dans le paquet ($[\Delta E/E]^3$).

Les collisions des électrons dans le paquet entraînent des oscillations et une dispersion des énergies. Une "bonne" machine est capable d'accepter les oscillations en énergie et de réduire les écarts correspondants. Au demeurant, l'effet ($[\Delta E/E]^3$) est sensiblement plus important dans le domaine des basses énergies que pour les hautes énergies.

Au reste, l'énergie de la machine exerce une influence considérable sur la durée de vie des faisceaux. Le tableau suivant illustre d'une part les

améliorations que l'on peut obtenir en haussant l'énergie d'une machine initialement de basse énergie et d'autre part l'écart qui continue d'exister avec un synchrotron conçu d'entrée au niveau optimal.

Tableau 10 : Influence de l'énergie sur la durée de vie des faisceaux

synchrotron	énergie	durée de vie
Soleil	2,5 GeV	20 h
ALS (Berkeley après up grade)	1,9 GeV	4 h
ALS (Berkeley initial)	1,5 GeV	1,5 h

Par ailleurs, si l'on veut un régime adapté à des mesures temporelles, il est nécessaire d'avoir peu de paquets d'électrons produisant des flashes courts, la durée de vie sur une machine comme l'ALS tombe alors à environ 20 mn. Une durée de vie insuffisante des faisceaux oblige à réinjecter des électrons en permanence, ce qui est un "remède" pire que le mal.

Une énergie de 1,5 GeV rend impossible les études de structure temporelle.

Or il s'agit là d'un domaine d'étude historiquement fort en France, qui doit être pérennisé car ses applications sont de plus en plus nombreuses. C'est ainsi que l'étude des structures temporelles représente près du tiers de l'activité de Super-ACO.

Par ailleurs, la longueur d'onde fondamentale du rayonnement produit par un onduleur est fonction de la période magnétique et de l'inverse du carré de l'énergie ($1/E^2$). Pour obtenir des longueurs d'ondes correspondant à la gamme V – UV (visible - ultra violet), il est nécessaire d'avoir des onduleurs de grande période magnétique.

Au final, un synchrotron idéal pour les études en structure temporelle aura une énergie minimale de 2 GeV pour livrer des faisceaux de haute brillance avec une durée de vie suffisante.

En tout état de cause, les spécialistes des applications qui se font à basse énergie, rejettent l'idée de faisceaux d'énergie trop élevée, car ils

nécessitent des onduleurs d'une longueur physique trop élevée et diminuent la durée de vie des optiques, des réseaux et des échantillons par effet de brûlure.

On trouvera ci-après des extraits de la note préparée par le LURE en réponse aux questions posées lors de la visite du 27 janvier 2000.

" Du côté du domaine basse énergie (lignes VUV), la communauté française est forte et structurée. Elle utilise largement le rayonnement synchrotron pour des expériences de physico-chimie des matériaux, de physique atomique et moléculaire ainsi que de biologie. Une de ses spécificités est une grande expérience dans l'utilisation de la nature pulsée du faisceau pour des mesures impliquant sa structure temporelle. Faire ces mesures dans de bonnes conditions exige la possibilité d'avoir en orbite des paquets d'électrons espacés et courts, quoique de haute densité afin de conserver une brillance suffisante. Pour avoir simultanément une bonne structure temporelle, une haute brillance et une bonne durée de vie (voir discussion sur l'effet Touschek dans l'encadré I), la conclusion de ces équipes - qui ont essayé un grand nombre de configurations sur diverses machines - a été que l'énergie de SOLEIL doit être d'au moins 2 GeV. Une énergie trop basse dégraderait la durée de vie et augmenterait très fortement la perturbation des onduleurs sur l'orbite des électrons, au point d'interdire leur ajustement en temps réel. Une énergie trop élevée (au-delà de 2,5 GeV environ) conduirait à des onduleurs trop longs ou à une dégradation inacceptable des optiques des lignes V-UV à cause de la puissance émise. Par exemple, pour un onduleur d'une longueur donnée, le passage de 2,5 à 3,0 GeV entraîne un doublement de la puissance totale et un quasi-triplement de la densité de puissance "

Encadré II

Sur la durée de vie des faisceaux d'électrons dans un anneau de stockage

La durée de vie du faisceau stocké est définie comme l'intervalle de temps nécessaire à la réduction par e ($e = 2,718\dots$) du nombre d'électrons en orbite. Une longue durée de vie est évidemment un des éléments les plus importants dans les performances d'un anneau synchrotron.

Les électrons en orbite dans un anneau de stockage peuvent être perdus essentiellement par des interactions des électrons avec les atomes de gaz résiduel ou par des interactions entre électrons eux-mêmes dans le paquet (effet Touschek).

A basse énergie, l'interaction électrons-gaz est dominée par la diffusion élastique coulombienne des électrons sur la charge des noyaux d'atomes du gaz résiduel, qui varie en $1/\gamma^{2^*}$. Les électrons sont perdus si l'angle de diffusion excède l'acceptance physique de l'anneau. Cette dernière est déterminée par les dimensions de la chambre à vide et par l'acceptance dynamique **. Une autre contribution, plus faible et pratiquement indépendante de l'énergie, est due à la diffusion inélastique (émission de Bremsstrahlung).

L'effet Touschek résulte de l'interaction entre deux électrons d'un même paquet qui effectuent des oscillations transverses (bétatron) et longitudinales (synchrotron). De l'écart entre les impulsions bétatron et synchrotron de ces électrons peut résulter un transfert d'énergie de la direction transverse vers la direction longitudinale. Le passage du référentiel du paquet d'électrons au référentiel du laboratoire multipliant les impulsions par le facteur γ , le transfert d'impulsion peut devenir substantiel : en fait, si l'écart en énergie dans la direction longitudinale est supérieur à l'acceptance en énergie de l'anneau, il y a perte des particules. La contribution à la durée de vie Touschek est proportionnelle à $\gamma^{2,5}$ (approximativement), à $1/\rho$ et à $(\Delta E/E)^3$, où ρ est la densité volumique de charge dans le paquet et $\Delta E/E$ est l'acceptance en énergie de l'anneau. L'effet Touschek est dominant dans les anneaux de 3ème génération. La faible émittance (donc ρ grande) requise pour ces machines influe négativement sur la durée de vie Touschek, et ceci peut être compensé en accroissant l'énergie et l'acceptance dynamique. Toutefois, cette acceptance est limitée par les éléments d'insertion, et cette limitation est beaucoup plus grande à énergie plus basse. Il en résulte que, pour une machine donnée, la diminution de la durée de vie avec l'abaissement de l'énergie est beaucoup plus rapide que la dépendance en $\gamma^{2,5}$ indiquée ci-dessus. Ceci est bien illustré par le cas de l'ALS à Berkeley. La durée de vie du faisceau de l'ALS est 4 h à 1,9 GeV et 1,5 h à 1,5 GeV. En régime adapté aux mesures temporelles (paquet unique court et de haute densité), la durée de vie s'effondre à 20 minutes.

La solution de l'injection à intervalles rapprochés (top-up) a été envisagée pour pallier une courte durée de vie. Toutefois, le top-up entraînerait des fluctuations et changements d'échelles qui sont inacceptables pour la plupart des utilisateurs.

* γ est le facteur de Lorentz, c'est à dire le rapport entre l'énergie totale de la particule et son énergie au repos.

*** L'acceptance dynamique est l'amplitude transversale maximale des électrons pour laquelle le mouvement reste stable ; elle est déterminée par l'optique de l'anneau.*

4.2.2. Les conditions de la haute énergie

Un premier constat de base doit être fait. Grâce à l'évolution technologique, en particulier sur les onduleurs, il n'est plus nécessaire, en l'an 2000, de construire une machine de l'énergie de l'ESRF (6 GeV) pour produire des rayons X "durs" avec un synchrotron. Une machine de moyenne énergie suffit, dont le coût est plus faible.

Pour obtenir des photons de haute énergie, c'est-à-dire des rayons X "durs", un synchrotron de moyenne énergie doit être doté d'onduleurs courts présentant un entrefer étroit (10 à 30 mm). La technologie des aimants permanents placés dans des chambres sous vide représente une solution performante à cet égard.

Lorsque l'anneau a une énergie de départ insuffisante, la solution est d'ajouter des "wigglers" multipôles pour obtenir des rayons X. Cette solution, au demeurant coûteuse, a été utilisée à BESSY II (Berlin), ELETTRA (Trieste) et ALS (Berkeley). Les "wigglers" permettent la production de rayons X mais souvent avec des brillances relativement peu élevées.

En réalité, une telle solution est inférieure à celle qui consiste à implanter des onduleurs sur une machine d'énergie suffisante, comme dans le cas de la source SLS (Villigen, Suisse) d'une énergie de 2,4 GeV ou dans celui de SOLEIL.

Il faut noter, par ailleurs, que les très hautes énergies atteintes à l'ESRF n'ont pas, pour le moment, suscité un engouement particulier de la part des scientifiques. Le bilan scientifique des très hautes énergies est à l'heure actuelle modeste.

La note précitée continue de la manière suivante.

" Du côté des rayons X, l'utilisation des onduleurs X est une exigence, en particulier pour les besoins de la cristallographie des protéines. Les onduleurs à entrefer étroit actuels (encadré II) donnent de très hautes performances en brillance pourvu que l'énergie soit au moins 2,4 GeV. SOLEIL à 2,5 GeV sera une source remarquable de rayons X. Les diagrammes montrent qu'un onduleur de conception prudente (entrefer

de 10 mm, période de 31 mm) atteint une brillance de 10^{19} vers 1 Å (énergie des photons 12,4 keV) à l'énergie nominale 2,5 GeV. Des onduleurs encore plus performants (entrefer de 4mm), dont on peut penser que l'installation sera possible, si nécessaire, dès que le fonctionnement de SOLEIL sera bien maîtrisé, permettront d'atteindre une grande brillance à des longueurs d'onde encore plus courtes ".

4.2.3. L'optimum de 2,5 GeV

La communauté des utilisateurs de photons de basse énergie n'est pas intéressée par un synchrotron de basse énergie, notamment parce qu'une telle machine ne pourrait pas satisfaire leurs besoins parallèles en rayons X.

En réalité, l'avant-projet détaillé SOLEIL a défini une plage d'utilisation de 2,5-2,75 GeV, dans laquelle le fonctionnement optimisé se ferait à 2,5 GeV avec des passages possibles à 2,75 GeV, temporairement.

Au reste, un synchrotron de 1,5 GeV n'a pas un coût sensiblement inférieur à celui d'une machine de 2,5 GeV, sauf si son nombre de lignes de lumière est nettement inférieur, l'économie provenant alors non pas de la baisse d'énergie mais de celle du nombre de lignes de lumière.

Selon le LURE, les raisons de l'existence d'un optimum d'énergie pour un synchrotron moderne sont au total les suivantes :

" En conclusion, les besoins et les particularités de la communauté française sont satisfaits avec le choix de 2,5 GeV pour SOLEIL. Il existe des raisons très fondamentales qui conduisent à ce choix et à nul autre. Un anneau de 1,5 GeV, par exemple, aurait des performances médiocres (en particulier en durée de vie) pour la communauté VUV et conduirait à une machine de second ordre dans le domaine X. Une énergie sensiblement plus élevée que 2,5 GeV ne convient pas non plus à la communauté basse énergie.

" Il faut aussi noter la stabilité du comportement de SOLEIL dans une large gamme d'énergie. Tel qu'il est, SOLEIL pourra fonctionner occasionnellement à 1,5 GeV (le laser à électrons libres sur anneau ne peut pas fonctionner au-delà de 1,5 GeV compte tenu de la détérioration des miroirs de la cavité optique) et 2,75 GeV. Le caractère occasionnel du fonctionnement à ces énergies est lié au caractère exclusif de leur domaine d'utilisation (exclusion des X à 1,5 GeV et exclusion de la très

basse énergie à 2,75 GeV). Cette adaptabilité est un avantage décisif pour faire face aux besoins nouveaux et imprévus qui surgiront dans le futur.

" Enfin, un anneau de basse énergie offrant le même nombre d'insertions que SOLEIL ne permettrait pas de réaliser d'économies significatives. Pour disposer du même nombre d'insertions, l'anneau comporterait en effet le même nombre de cellules et conserverait approximativement la même circonférence, et par conséquent le bâtiment serait de taille très similaire. La seule économie serait sur la puissance des éléments magnétiques et celle des cavités accélératrices. Quant aux lignes de lumière et aux dispositifs expérimentaux, la présence de wigglers multipôles (dont certains à éléments supraconducteurs) au lieu d'onduleurs X aurait une incidence négative sur les coûts de construction et d'exploitation pour des performances moindres. Envisager un projet basse énergie beaucoup moins coûteux que SOLEIL suppose donc implicitement des capacités en lignes de lumière largement réduites ".

4.2.4. Les raisons des choix faits pour SOLEIL

Au vrai, le projet SOLEIL avec une énergie de 2,5 GeV présente bien un optimum en terme de stabilité des faisceaux, de capacité à délivrer des rayonnements de toutes longueurs d'onde et à rendre possible l'étude des structures temporelles.

Au reste, le projet SOLEIL présente une véritable complémentarité par recouvrement avec le projet DIAMOND, dont l'énergie devrait probablement ressortir à 3,5 GeV. En outre, SOLEIL, machine non spécialisée, a un potentiel d'ouverture considérable sur de nouvelles applications, notamment dans le domaine des études dynamiques. La définition de SOLEIL est au total justifiée par les raisons suivantes :

" L'énergie d'un anneau de stockage à électrons est un paramètre crucial pour les performances de l'installation et sa conception générale. Sa taille est un critère distinct qui intervient directement sur le nombre d'insertions (onduleurs), qui se répercute sur le nombre d'expériences que l'on peut y installer et le coût. L'énergie nominale choisie pour SOLEIL est de 2,5 GeV, avec une utilisation occasionnelle à 1,5 GeV et à 2,75 GeV.

SOLEIL a été conçu de manière à satisfaire les besoins d'une communauté d'utilisateurs très étendue dont les besoins vont des photons de basse énergie aux rayons X. On a également tenu compte de certaines spécificités des équipes françaises ".

4.2.5. L'irréalisme du concept de " machine dédiée " de faible énergie

L'évolution technologique des synchrotrons fait qu'aujourd'hui, le concept de machine " dédiée " à tel ou tel type d'application n'a pas de sens.

Ce concept résulte de la dichotomie qui a pu exister entre les synchrotrons d'énergie faible ou moyenne produisant des rayonnements VUV – X " mous " et la nécessité à laquelle il a fallu faire face pendant un temps de construire une machine de grande taille comme l'ESRF (6 GeV) pour produire des rayons X " durs ".

Une telle dichotomie n'a plus de sens aujourd'hui. Les synchrotrons sont de moins en moins spécialisés.

A condition de lui conférer d'entrée une énergie suffisante, un même synchrotron peut couvrir toute la gamme des longueurs d'onde, avec une égale efficacité. L'exemple type est celui de la machine suisse de Villigen, dont la définition est la plus récente et la construction en cours, qui présentera des hautes performances, à la fois dans la gamme V-UV – X " mous " et dans la gamme X – X " durs ".

Par ailleurs, la voie des machines dédiées de faible énergie (1,5 GeV), sans intérêt sur le plan scientifique, ne semble pas non plus présenter d'avantage économique. Les économies de construction sur les infrastructures et la source sont négligeables lorsque l'on passe d'une énergie de 2,5 GeV à 1,5 GeV. Les seules économies envisageables ne proviendraient pas de la réduction d'énergie mais de la diminution du nombre de lignes.

Une machine de basse énergie n'aurait aucune complémentarité avec les synchrotrons récemment construits sur ces bases, à savoir MAX II (Lund) et BESSY II (Berlin).

Enfin, si une augmentation de puissance à 2,5 GeV devait s'avérer nécessaire pour une machine construite à 1,5 GeV, le coût de transformation serait élevé, du fait de la nécessité d'implanter des " wigglers " multipôles coûteux en investissement et en fonctionnement.

4.3. Le passage de DCI et Super-ACO à SOLEIL

La durée de vie des installations du LURE à compter du début 2000 ne devrait pas dépasser 5 à 6 années si l'on veut éviter des dépenses importantes dues à leur vétusté. Outre la maintenance, des dépenses

d'infrastructure sont également nécessaires, notamment pour le désamiantage et la radioprotection. En dehors de ces considérations économiques, la durée de vie technique pourrait toutefois être supérieure.

La construction de SOLEIL sur l'actuel site du LURE à Orsay est difficilement envisageable, en dépit des économies qu'elle permettrait.

Ce sont l'étroitesse des terrains, la présence de l'Yvette, une rivière à crues et la mauvaise qualité du sous-sol qui compromettent cette solution.

Pour autant, il existe à proximité, sur le plateau de Saclay, un terrain de 50 ha avoisinant l'École polytechnique qui présente toutes les caractéristiques requises pour la construction du nouveau synchrotron SOLEIL.

Les expériences de DCI et Super-ACO transférables sur SOLEIL seront peu nombreuses.

En réalité, compte tenu des progrès techniques permanents faits sur l'optique des lignes et sur l'instrumentation, plus la construction effective de SOLEIL est repoussée dans le temps et plus les équipements du LURE sont obsolètes et inutiles pour ce dernier, d'où la disparition d'économies possibles à bref délai.

5. Les lasers à électrons libres

Déjà le premier à étudier le rayonnement onduleur sur lequel sont basées les machines de 3^{ème} génération, le LURE est le seul centre de rayonnement synchrotron à faire fonctionner des lasers à électrons libres sur anneau et sur accélérateur linéaire.

De fait, le laser à électrons libres sur Super-ACO a longtemps détenu le record de mise en évidence de l'effet d'interférences amplificatives pour les longueurs d'onde les plus faibles. Par ailleurs, CLIO, petit accélérateur linéaire de 50 MeV mis en service début 1992 a permis d'ouvrir un nouveau domaine d'applications de lasers infrarouge.

Dans les deux cas, il s'agit de provoquer un phénomène d'autoamplification spontanée du rayonnement afin de gagner plusieurs ordres de grandeur dans la brillance.

Toute la difficulté consiste à passer des longueurs d'onde élevées pour lesquelles cet effet a été observé à des longueurs d'onde de plus en plus faibles, de façon à le faire jouer, par exemple pour les rayons X.

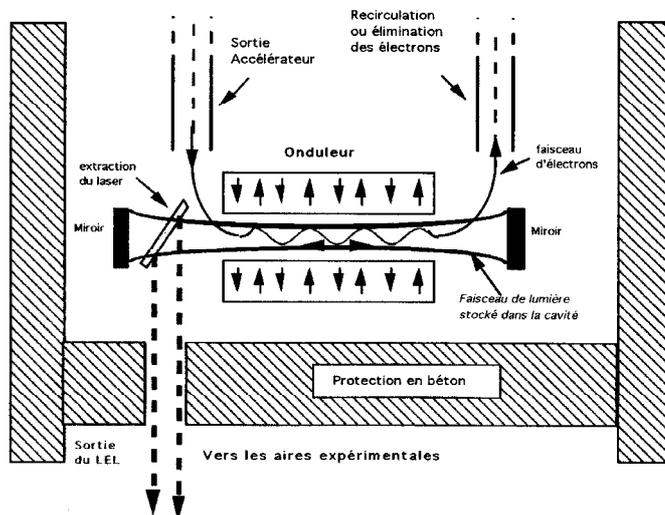
Les travaux sur les lasers à électrons libres sont peu nombreux dans le monde. Il s'agit d'une recherche de pointe pour mettre au point des machines complémentaires des anneaux de stockage.

La position du LURE dans la compétition mondiale sur les lasers à électrons semble être de bon niveau.

5.1. Le laser à électrons libres à cavité optique

Les lasers à électrons libres utilisant des cavités optiques ont pour principe la création d'interférences amplificatives. Leur avantage est d'être en principe accordables dans une large gamme d'énergie, grâce à la modification des deux paramètres modifiables que sont l'énergie des électrons et le champ magnétique de l'entrefer. La figure suivante présente un schéma de principe de ce laser à électrons libres.

Figure 1 : Schéma du laser à électrons libres du LURE



La démonstration de l'effet d'amplification a été faite pour des rayonnements d'une longueur d'onde égale ou supérieure à 20 μm . Il reste, tâche considérable, à descendre dans la gamme des longueurs d'onde.

5.2. L'effet SASE sur des onduleurs

L'effet SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) correspond à un autre schéma de laser à électrons libres. Dans ce schéma qui ne fait pas appel à une cavité optique, l'amplification s'effectue en un seul passage sur un onduleur de grande longueur. Cet effet a été observé en 1985-1986 aux Etats-Unis, au laboratoire de Lawrence Livermore, puis au MIT en 1988-1989 et enfin en 1997 sur l'installation CLIO du LURE pour des longueurs d'onde infrarouge.

L'avant-projet détaillé SOLEIL prévoit un onduleur de 14 m pour continuer les études sur l'effet SASE.

La difficulté est de parvenir à reproduire le gain obtenu dans l'infrarouge à des longueurs d'onde plus courtes.

Il s'agit ici aussi d'un domaine de recherche prometteur pour préparer des machines complémentaires des anneaux de stockage actuels. Le domaine des lasers à électrons libres est celui de l'optique non linéaire, alors que celui des anneaux de stockage est l'optique linéaire.

Les lasers à électrons libres devraient produire des rayonnements beaucoup plus puissants que les autres lasers, avec des accordabilités également supérieures. La brillance atteinte devrait être supérieure à celle des synchrotrons de 3^{ème} génération. L'objectif sera d'étudier la dynamique de différents phénomènes, notamment les réactions des protéines sur des intervalles de temps de quelques femtosecondes.

D'une manière générale, le LURE constitue un centre de compétences qui est un des nœuds du réseau de recherche sur les lasers à électrons libres. Le non-renouvellement de ses installations, en lui faisant perdre ses compétences et donc sa "*monnaie d'échange*" ferait inmanquablement sortir la France de la coopération internationale.

En outre, la France perdrait son rôle actif de fournisseur d'accès pour des pays ne possédant pas encore de synchrotrons et verrait donc disparaître sa position active vis-à-vis de pays comme l'Espagne.

Conclusion

Site pionnier du rayonnement synchrotron en France, le LURE constitue aujourd'hui en premier lieu un super-laboratoire au service de plusieurs centaines de laboratoires français répartis dans toute la France.

Simultanément, le LURE continue ses recherches avec succès sur les synchrotrons. Après avoir joué un rôle de premier plan dans la mise au point des premiers onduleurs, le LURE a été l'un des co-architectes de l'ESRF et participe à la course mondiale relative aux lasers à électrons libres.

Ses installations, malheureusement, commencent à être vieillissantes et saturées en terme d'encombrement, de sorte que la question est posée de leur remplacement depuis le début des années 1990.

Alors que le LURE, une communauté d'environ 400 personnes, dessert près de deux mille chercheurs et que ses résultats de recherche sont d'excellente facture comme le prouvent ses publications dans des revues prestigieuses, on ne voit pas que sa fermeture se puisse concevoir pour quelque motif que ce soit.

II – Visite de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) – Grenoble – vendredi 28 janvier 2000

Les informations présentées ci-dessous ont été rassemblées lors de la visite de l'ESRF, effectuée le 28 janvier 2000 par une délégation de l'Office. Elles résultent des propos de M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF et de ses collaborateurs.

I – Le rayonnement synchrotron : applications actuelles et besoins futurs

1. Perspectives qualitatives

1.1. La biologie structurale

Les protéines assurent un nombre très important de fonctions dans les organismes vivants. Il existe des protéines enzymes comme les lipases ou les synthétases. On trouve également des protéines de transport, comme l'hémoglobine. Certaines protéines sont structurales, comme la kératine ou le collagène. D'autres protéines jouent le rôle de transmetteurs de signaux, comme les protéines récepteurs et les protéines des canaux ioniques.

Or la fonction d'une protéine est étroitement reliée à sa structure. D'où l'importance d'élucider les structures des protéines pour comprendre comme fonctionnent ces "*micromachines*" du vivant.

1.2. Les besoins d'automatisation pour la résolution des structures

La croissance explosive de la demande de temps de faisceau pour les études structurales de molécules biologiques est un fait établi.

Au fur et à mesure de l'approfondissement de leur expérience dans l'utilisation du rayonnement synchrotron, les biologistes formulent de nouvelles demandes. Parmi celles-ci, il faut citer l'automatisation, parce qu'elle est très importante pour l'avenir.

La cristallisation d'une protéine est un processus difficile, artisanal et lent, aucune méthode générale ne pouvant s'appliquer à tous les cas de figure. La durée de cristallisation d'une protéine peut en effet varier de quelques heures à un an et se réaliser sous des conditions de température et de solvant extrêmement diverses.

De surcroît, plus la taille du cristal à obtenir est grande et plus les risques sont grands de voir apparaître des défauts de croissance dans le cristal, tels que des macles.

L'intérêt des utilisateurs est donc de pouvoir soumettre au rayonnement synchrotron les cristaux les plus petits possibles. A l'heure actuelle, les installations de l'ESRF peuvent traiter des cristaux de 20 μm , le faisceau pouvant être inférieur à 1 μm en hauteur. Il s'agit donc de pouvoir monter des cristaux de 20 μm sur un goniomètre, sans rupture de la chaîne de froid indispensable pour la conservation de la protéine. De telles opérations étant très délicates, les utilisateurs souhaitent leur automatisation, depuis l'extraction du conteneur de transport réfrigéré jusqu'au positionnement sur le goniomètre.

Il est manifeste que l'automatisation serait de nature à assurer un meilleur confort aux utilisateurs mais aussi à accélérer les passages en machine. Elle pourrait ouvrir la voie au "*screening*", c'est-à-dire au contrôle systématique rapide des cristaux avant les manipulations complètes liées aux études structurales.

L'automatisation est probablement à même de limiter l'augmentation du nombre de lignes de lumière requises par l'explosion de la demande de la biologie structurale en temps de faisceau mais elle ne peut pas la satisfaire à elle seule.

L'industrie européenne se caractérise par un retard certain sur l'industrie américaine dans ce domaine et devrait le combler à l'avenir, ce qui augmentera encore la demande de temps de faisceau.

1.3. Les applications médicales

Les applications médicales sont parmi les plus spectaculaires des applications nouvelles du rayonnement synchrotron à l'ESRF. Plusieurs voies de recherche sont actuellement explorées tant sur ce synchrotron qu'à DESY (Hambourg), ELETTRA (Trieste) et au Japon.

La première catégorie est celle de l'imagerie médicale. L'intérêt exceptionnel du rayonnement synchrotron est non seulement de fournir des images d'une rare qualité de définition mais également de livrer des données quantitatives sur les concentrations in vivo. Les principales recherches concernent l'imagerie cardiovasculaire (coronarographie par voie intraveineuse) et rénale, la tomographie, la bronchographie et la mammographie par contraste de phase. Dans tous les cas, des résultats importants sont déjà obtenus, la question essentielle à résoudre étant celle de la généralisation des méthodes mises au point à un public étendu.

Le rayonnement synchrotron fait également l'objet d'applications thérapeutiques, par exemple les thérapies par activation photonique ou par microfaisceau.

1.4. Les structures temporelles

Grâce à ses pulsations de très faible période, le rayonnement synchrotron se prête à l'étude des phénomènes dynamiques et donc à la résolution de structures temporelles.

1.5. Le cas particulier de la tomographie 3D

La cohérence du rayonnement synchrotron permet la reconstruction d'images en trois dimensions par contraste de phase. Cette nouvelle possibilité des synchrotrons trouve déjà des applications importantes dans l'analyse des matériaux qui absorbent peu les rayons X, par exemple les polymères, alors que la méthode n'a été mise au point qu'il y a trois ans. Parmi les principaux résultats de cette méthode, figurent les défauts dans les quasi-cristaux, l'interface liquide-catalyseur, les éponges de polymères et les structures des catalyseurs.

La demande d'expérimentations de ce type est en forte croissance et représente d'ores et déjà la deuxième source de financement extérieur de l'ESRF.

1.6. Les autres applications

L'ESRF constate des demandes croissantes de l'industrie pour le contrôle de formules pharmaceutiques. Ainsi, comme l'activité des molécules dépend de la présentation des médicaments, l'étude des poudres revêt une importance croissante dans l'industrie pharmaceutique, ce qui conduit l'ESRF à proposer une assistance particulière aux utilisateurs dans ce domaine, ce qui se traduira probablement par l'embauche d'un ingénieur.

La croissance de la demande pour l'imagerie rayons X a conduit à un autre recrutement, ainsi que les études liées à la microélectronique.

Les études sur le magnétisme connaissent également une très forte croissance. L'accès rapide au rayonnement synchrotron est là aussi un facteur décisif pour les chercheurs dans ce domaine.

2. Les besoins quantitatifs

2.1. Les indicateurs à utiliser

S'agissant des statistiques relatives aux performances des synchrotrons comme aux besoins en rayonnement synchrotron, la nature de l'indicateur utilisé est d'une grande importance. Il convient de distinguer le nombre d'utilisateurs et le temps de faisceau.

En effet, l'élucidation de plusieurs structures de protéines peut être faite en 8 heures, les données étant récupérées en 5-6 minutes dans certains cas et la structure étant reconstituée par ordinateur en 35 minutes.

Au contraire, une expérimentation sur une surface doit durer au moins une semaine, tant les manipulations préparatoires peuvent être délicates et longues.

2.2. Les prévisions en matière de besoins

Pour M. Yves FARGE, les besoins à l'avenir seront de 70 % de rayons X et 30 % pour les UV et les X "mous".

M. Yves PETROFF aboutit à une répartition voisine : 60 % pour les rayons X et 40 % pour les UV et les X " mous ".

Les applications des UV et des rayons X " mous " ne peuvent pour autant être tenues pour négligeables. En tout état de cause, il est indispensable de pouvoir disposer d'une diversité dans les méthodes d'analyse afin d'étudier les propriétés électroniques d'un matériau nouveau, domaine où sont utiles les UV et les X " mous ", ainsi que les structures atomiques, domaine des rayons X " durs ".

S'agissant des rayons X, la biologie ne représentera que 30 % des temps de faisceau.

Ce chiffre est voisin de ce que l'on observe actuellement à l'ESRF. Ainsi, en temps de faisceau, la biologie n'est pas le premier utilisateur des synchrotrons

Une erreur est donc commise par de nombreux observateurs, celle de croire que la biologie représente à elle seule l'avenir des rayons X produits par les synchrotrons. Rien n'est plus faux puisque les sciences physiques et chimiques devraient représenter 70 % du temps de faisceau en rayons X.

Au demeurant, la croissance des besoins de la biologie est réelle. Certes, l'automatisation viendra sans doute atténuer les investissements nécessaires en lignes supplémentaires. Mais les besoins sont en forte croissance. Il est probable à cet égard que, conformément à ce qu'a estimé M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, la biologie devienne une source de revenus importante pour les synchrotrons.

Au reste, il faut souligner le retard de l'Europe sur les Etats-Unis, ainsi que le montre le tableau suivant construit par M. Yves PETROFF.

Tableau 11 : Evolution des lignes disponibles pour la biologie

nombre de lignes de lumière pour la biologie	1999	2002
Etats-Unis	24	40
Europe	13	20

Les ventes pures et simples de temps d'accès à l'ESRF pour des expérimentations urgentes et confidentielles sont en croissance forte.

Elles ont doublé entre 1998 et 1999. Les perspectives détaillées pour 2000 sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Estimations des ventes de temps de faisceau de l'ESRF pour 2000

Estimations pour 2000	Shifts (8 heures de temps de faisceau)
Utilisateurs non différenciés	150
Wellcome Trust	150-300
Rayons X	100
Medea (microélectronique)	100
Total en shifts	575
Total en francs	10 millions

Un autre facteur devrait faire croître les demandes de temps d'accès. La plupart des laboratoires de recherche dans le domaine de la biologie bénéficient de contrats avec des industriels. Compte tenu de la pression de la concurrence, le facteur temps devient une variable critique. En conséquence, l'industrie pourrait pousser la recherche publique à utiliser davantage le rayonnement synchrotron. A l'heure actuelle, 20 à 25 % du temps de faisceau sont d'ores et déjà utilisés par des équipes universitaires liées à des groupes industriels.

En outre, la construction de sources performantes révèle les besoins et conduit de nouveaux utilisateurs, notamment industriels, à accéder à ces ressources.

M. Yves PETROFF a ainsi indiqué qu' *" au début des années 90, je croyais que la demande de temps de faisceau allait ralentir sa croissance. En réalité on ne constate aucun ralentissement, ni aux Etats-Unis, ni en Europe, ni au Japon "*.

II – Les concurrents des synchrotrons actuels

1. Les mini-synchrotrons

Les mini-synchrotrons représentent une voie intéressante pour des applications industrielles. A cet égard, on peut imaginer un développement des mini-synchrotrons pour la microélectronique. La lumière cohérente produite par les grandes installations, qui se caractérisent par une faible émittance, entraîne en effet la formation d'interférences défavorables à la lithographie, au contraire de celle produite par d'éventuels mini-synchrotrons.

2. La RMN

Pour M. Yves PETROFF, la RMN à 1 GHz, un projet lancé il y a une quinzaine d'années, a tout du mythe durable. La mise au point d'un prototype ne peut se faire avant 5 à 7 ans. D'une part, les difficultés techniques sont considérables, et d'autre part, les spécialistes du magnétisme réclament en vain aux biologistes une prise en charge du projet. De plus, l'homogénéité sera insuffisante pour les structures biologiques, d'où une application préférentielle à la chimie.

En tout état de cause, selon M. Yves PETROFF, cette méthode ne pourra pas s'appliquer qu'à des molécules de taille limitée. La résolution du ribosome ou des gros virus comprenant jusqu'à 25 millions d'atomes semble hors de portée.

En revanche, la RMN est complémentaire du rayonnement synchrotron pour la résolution de petites structures " *en solution* ".

3. Les lasers à électrons libres et les synchrotrons de 4^{ème} génération

L'effet SASE d'amplification sans saturation à la base des lasers à électrons libres a été démontré pour des longueurs d'onde de 15 à 20 μm , c'est-à-dire dans l'infrarouge. L'effet d'amplification s'atténue lorsque la longueur d'onde diminue. Il reste donc un chemin très important à faire pour parvenir à provoquer ce phénomène pour les longueurs d'onde de l'ordre de l'angström qui correspond aux rayons X.

En toute hypothèse et avec les connaissances actuelles, un laser à électrons libres de forte énergie appartient au domaine de la recherche fondamentale à conduire dans le cadre d'une coopération mondiale. Le coût d'un laser à électrons libres dans le spectre des rayons X pourrait atteindre 60 à 70 milliards de francs, soit plus de vingt fois celui de l'ESRF, mais il s'agirait d'un projet commun à la physique des particules et au rayonnement synchrotron.

Au demeurant, une telle machine, à supposer qu'elle puisse être mise au point, ne couvrirait qu'une partie marginale des besoins en rayonnement synchrotron.

Les anneaux de stockage ont donc un bel avenir devant eux.

III – Les effets d'entraînement scientifique et économique des synchrotrons

1. Les effets d'entraînement scientifique

L'examen de la littérature scientifique mondiale démontre que les synchrotrons constituent des outils d'excellence scientifique, permettant d'acquérir et de maintenir une position compétitive dans la science mondiale.

1.1. Les indispensables précautions méthodologiques

La mesure des performances des synchrotrons par le nombre de publications scientifiques réalisées grâce à chacun d'eux doit être assortie de précautions.

En raison de l'application de plus en plus rapide des résultats de la recherche fondamentale, il est en effet fréquent que la presse non spécialisée cite des articles publiés par des revues scientifiques spécialisées. Ainsi, grâce à un travail réalisé en collaboration entre l'ESRF, l'Oréal et le Musée du Louvre, il a été démontré que la civilisation égyptienne avait la maîtrise de procédés de chimie humide, utilisés en l'occurrence dans des produits de maquillage, deux composants artificiels ayant été identifiés.

Ce résultat, publié dans la revue "*Nature*", a été repris par la grande presse, ce qui n'a pas été le cas pour un autre article du même numéro de "*Nature*", relative à un article sur la structure de la glace sous une pression de 1,7 million de bars et qui, d'un point de vue scientifique, est beaucoup plus important.

Par ailleurs, pour comparer la productivité des synchrotrons, il est impératif de tenir compte des différences de performances intrinsèques. Ainsi, le faisceau du LURE présente une hauteur de 3 à 4 mm alors que celle d'un faisceau standard de l'ESRF est de 8 μm .

Au total, le nombre absolu de publications n'a pas de signification. La qualité des revues et des articles doit nécessairement être prise en compte.

1.2. Les synchrotrons, instruments de compétitivité scientifique

Parmi les grandes premières mondiales réalisées à l'ESRF, figure l'élucidation de la structure du virus de la langue bleue, la structure du nucléosome, l'étude de l'hydrogène et de la glace à des pressions très élevées (1 à 2 millions de bars), et l'imagerie en lumière cohérente. On peut aussi signaler les études temporelles à l'échelle de 100 picosecondes, par exemple celle relative à la fixation du CO sur la myoglobine, grâce à la qualité de ses faisceaux et en particulier de leur parallélisme et grâce à celle de son instrumentation.

L'ALS de Berkeley a, depuis quelques années, accumulé de nombreux succès expérimentaux dans la résolution des structures de protéines grâce à la présence, au sein et autour du synchrotron, des groupes scientifiques de niveau mondial. Le nombre de publications obtenu avec la seule " *expérience* " dont dispose l'ALS dans ce domaine, est le premier au monde.

Certes la source n'est pas la meilleure que l'on puisse trouver, mais la qualité des chercheurs, résidents ou permanents, un facteur critique dans la rentabilisation de l'équipement au niveau scientifique, repousse les limites de l'équipement.

M. Yves PETROFF a donné les premiers résultats d'une étude qu'il a effectuée sur les publications des principaux synchrotrons mondiaux, dans les revues scientifiques les plus prestigieuses. Les résultats en seront disponibles d'ici à quelques semaines.

1.3. Les synchrotrons, outils de formation des chercheurs

L'ESRF a conduit récemment une étude sur le devenir de ses anciens salariés chercheurs et techniciens.

Sur les 130 personnes répertoriées, 50 à 60 % ont obtenu, après leur départ de l'ESRF, des postes universitaires ou dans des organismes de recherche et 30 % ont été embauchés dans l'industrie. Au total, les anciens salariés de l'ESRF n'ont pas rencontré de difficultés majeures pour retrouver un emploi.

2. Les effets d'entraînement économique

Les effets directs d'entraînement économique d'une installation comme le synchrotron s'exercent par l'intermédiaire des dépenses annuelles de fonctionnement mais aussi par les investissements initiaux et de rajeunissement.

Sur les quatre cent millions de francs de budget annuel de l'ESRF, 300 millions de francs sont dépensés en France, pour une contribution française annuelle de 110 millions de francs.

S'agissant des investissements, le coefficient de retour est de 1,4 pour une part de 27,5 % dans un investissement de 2,2 milliards de francs étalé sur 11 ans (de 1988 à 1998).

Ce coefficient de retour largement supérieur à 1 correspond au "*privilege du site*", habituel pour le pays hôte.

Le coefficient de retour du Royaume Uni atteint pour sa part 1,2. Dès la signature de la convention internationale donnant naissance à l'ESRF, le Royaume Uni a, suivant ainsi sa tradition, constitué un groupe d'industriels britanniques susceptibles de soumissionner aux appels d'offre.

IV – Un optimum de taille existe-t-il en termes de performances et de coûts ?

1. L'optimum en énergie

1.1. Le rapport Birgeneau

La question de l'optimum d'énergie d'un synchrotron a longuement été évoquée dans le rapport Birgeneau, élaboré par un comité scientifique américain de haut niveau regroupant 18 spécialistes des synchrotrons, utilisateurs et chercheurs de toutes disciplines. Ce rapport présente des évaluations des sources existantes et des recommandations pour de nouvelles sources de rayonnement synchrotron.

Le synchrotron ALS de l'université de Berkeley d'une énergie de 1,9 GeV a été sévèrement jugé par le comité Birgeneau, en raison de résultats scientifiques faibles au démarrage de l'installation. En conséquence, le rapport Birgeneau a stigmatisé les inconvénients de machines de 1,5 GeV à 2 GeV, dont la construction avait été décidée pour répondre aux besoins en UV et X "*mous*", jugés les plus importants lors de la décision de construire l'ALS.

La vérité oblige à dire toutefois que cette installation n'avait pas été autorisée au départ à dépasser des énergies de 4 keV, ce qui réduisait le nombre d'utilisateurs à 300 et donc le nombre de résultats scientifiques publiés. La vérité oblige aussi à dire que, peu après la publication du rapport, le nouveau directeur de l'installation, M. Chemla, d'origine française, a entamé une remise en ordre complète de l'installation. Aujourd'hui, l'ALS dispose d'une nouvelle ligne de lumière destinée à la biologie qui a les meilleures performances par station expérimentale de tous les synchrotrons américains.

Il est à noter que l'ESRF dispose d'une ligne utilisée à des niveaux d'énergie semblable, qui rencontre également de grands succès. Grâce à la durée de vie de 60 heures des paquets d'électron et l'extrême finesse du faisceau, les expériences de spectroscopie et de diffraction exécutées à des énergies comprises entre 1 keV et 300 keV font l'objet d'une forte demande.

Au demeurant, la grille d'analyse proposée par le rapport Birgeneau était la suivante :

- les rayonnements UV et X mous produits par les machines d'énergie inférieure à 2 GeV, d'une part, et, d'autre part,
- les rayons X et X durs produits par les machines d'énergie d'environ 6 GeV.

Cette distinction a perdu de sa pertinence depuis lors, à cause de la faible émittance des sources de 3^{ème} génération. En effet l'implantation de " *wigglers* " ou d'aimants supraconducteurs sur une section droite d'une source brillante d'environ 1,9 GeV permet d'obtenir des rayons X d'une bonne qualité. La même opération peut être faite avec des onduleurs.

Toutefois les responsables de l'ALS de Berkeley regrettent encore que le niveau d'énergie de leur machine soit trop bas et opteraient aujourd'hui, si cela était à refaire, pour un niveau de 2,5- 3 GeV.

1.2. Les limites des machines de faible énergie

Les trois à quatre sources européennes dont l'énergie est de l'ordre de 1 à 1,5 GeV apparaissent trop limitées à leurs responsables. Il est certes possible de remonter en énergie mais au prix d'investissements importants et pour obtenir au total de résultats inférieurs à ceux des sources d'énergie plus élevée.

La raison en est que les faisceaux sont instables lorsque l'énergie du synchrotron est faible. Avec une énergie de 1,9 GeV et a fortiori de 1,5 GeV, la durée de vie des paquets d'électrons est trop courte. Pour hausser l'énergie, il faut des investissements lourds en aimants supraconducteurs, dont le fonctionnement est au demeurant peu ajustable.

En définitive, M. Yves PETROFF estime que l'optimum est 2,5-3 GeV, qui permet d'avoir des faisceaux stables et des durées de vie correctes.

2. L'optimum en termes de coûts

2.1. L'importance du coût des lignes de lumière

Le coût de l'instrumentation des lignes de lumière pour la biologie est aujourd'hui bien connu et a tendance à augmenter.

A titre d'exemple, le prix des détecteurs CDD est passé de 1,5 million de francs à 4,5 millions de francs en 3 ans, et devrait atteindre probablement 6 millions de francs dans deux ans. D'où l'intérêt de grouper les achats au niveau européen.

Au reste, l'ESRF a démontré que, par une politique d'appels d'offre élargis à l'ensemble de l'Europe, voire du monde, il est toutefois possible de diminuer les prix d'environ 20 %.

Le poids des lignes de lumière est au total très important dans le total de l'investissement. En conséquence, l'importance de l'énergie en termes de coûts apparaît relativisée.

2.2. La nécessité d'évaluations exhaustives

Le cas du SLS, synchrotron suisse en cours de construction, est un exemple d'évaluations dont la rigueur a été insuffisante au départ.

Le coût de construction de ce synchrotron de 2,4 GeV a été présenté au départ comme égal à 600 millions de francs. Les constructeurs ont ensuite précisé que ce coût ne comprenait pas celui des lignes de lumière. Les dépenses en personnel ont à leur tour été rajoutées. De sorte que le coût de cet équipement ressort aujourd'hui à 1,2 milliard de francs, soit le double de l'estimation de départ pour 5 lignes de lumière.

Un autre élément doit être pris en compte dans les budgets de fonctionnement, en particulier les recettes additionnelles aux crédits

budgétaires. Ainsi, ce poste peut être très important pour certaines installations comme l'APS d'Argonne où seules 6 lignes sur les 50 sont construites sur le budget du laboratoire, ce qui veut dire que le budget annuel réel est de 85 + 45 millions de dollars.

2.3. Un optimum de 3 GeV

Selon M. PETROFF, la différence de coûts de construction entre un synchrotron à 1,9 GeV et un synchrotron à 2,5 ou 3 GeV est faible.

La relation entre le coût de construction d'un synchrotron et son énergie est en effet au maximum linéaire plutôt que quadratique.

Au demeurant, la manière dont la réalisation de l'investissement est gérée est fondamentale.

Pour réduire les coûts de construction et de jouvence de l'installation, il est indispensable de planifier les dépenses d'investissement. Ainsi, l'ESRF dispose de 62 dispositifs d'insertion. Des appels d'offre ont été passés pour la fourniture de ces appareils, avec un nombre total fixé à l'avance. Le constructeur sélectionné a pu ainsi amortir les coûts de réalisation des outils spécifiques sur une série longue, ce qui permet à l'ESRF de mettre en œuvre les onduleurs les moins coûteux du monde.

En toute hypothèse, le niveau d'énergie 2,5-3 GeV semble constituer l'optimum, tant en termes d'énergie que de coûts.

V – Les propositions de solutions pour la France, présentées par M. Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF

1. " La dépense française en rayonnement synchrotron n'est pas disproportionnée "

La dépense française dans le domaine du rayonnement synchrotron est-elle disproportionnée ?

Selon Yves PETROFF, directeur général de l'ESRF, il n'en est rien.

1.1. Des dépenses annuelles par chercheur limitées

La contribution du CNRS au budget annuel de l'ESRF est de l'ordre de 55 millions de francs, pour 1000 utilisateurs français chaque année, à mettre en perspective avec un budget annuel de 6 milliards de francs.

Au total la France dépense chaque année 250 millions de francs pour le rayonnement synchrotron, soit 130 millions de francs pour le LURE et 110 millions de francs pour l'ESRF. Les 110 millions de francs versés à l'ESRF sont pris en charge pour moitié par le CEA et par le CNRS. La dépense totale ressortit donc à 110 000 francs par an et par chercheur.

1.2. Des dépenses inférieures à celles des autres pays

M. Paul CLAVIN a affirmé que les Etats-Unis dépensent moins que la France pour le rayonnement synchrotron. En réalité, des lacunes existent dans son recensement des synchrotrons financés en partie ou en totalité par le budget fédéral, ce qui minimise la contribution de ce dernier.

D'après M. CLAVIN, les dépenses annuelles des Etats-Unis dans le domaine des synchrotrons s'élèvent en apparence à 1 milliard de francs. En réalité, ce chiffre doit être doublé car 3 centres de rayonnement synchrotron n'émargent pas au budget du DOE – Chess, Wisconsin et Louisiana – et que seule une petite partie des lignes est financée sur le budget du laboratoire.

Selon M. Yves PETROFF, si la France dépensait proportionnellement autant que les Etats-Unis dans le domaine du rayonnement synchrotron, le montant des crédits alloués à ce domaine s'élèverait à 400 millions de francs, au lieu des 250 millions actuels.

Au demeurant, selon M. Yves PETROFF, les crédits consacrés aux très grands équipements diminuent en France de 10 % par an depuis plusieurs années. Sans doute conviendrait-il, si cela était possible dans la pratique, de poser clairement la question à la communauté scientifique de savoir quels crédits elle est disposée à allouer au rayonnement synchrotron.

Par ailleurs, deux chiffres sont souvent mis en comparaison, d'une part le budget annuel des très grands équipements (TGE), soit 4,5 milliards de francs et le budget d'investissement et de fonctionnement de laboratoires du CNRS, soit 1,5 milliard de francs.

En réalité, les deux chiffres ne sont pas comparables : le budget des TGE, exprimé en coûts consolidés, inclut les salaires. Par ailleurs, ce budget doit être rapporté aux 55 milliards de francs du budget de l'ensemble des organismes de recherche, soit 8 %.

Cette proportion est inférieure en tout état de cause à ce que l'on observe aux Etats-Unis, au Japon et en Allemagne.

1.3. L'importance de critères de comparaison rigoureux

En tout état de cause, toute comparaison de coûts des différents scénarios envisageables doit être faite sur 15 à 20 ans, en utilisant la méthode des coûts consolidés, c'est-à-dire en intégrant tous les investissements, initiaux et annuels, ainsi que l'ensemble des frais de fonctionnement, frais de personnel et taxes inclus.

2. " L'inadéquation du scénario de l'achat de lignes sur DIAMOND et sur d'autres synchrotrons européens "

Le scénario annoncé en août 1999 par le ministère de la recherche comprend non seulement l'achat de lignes sur DIAMOND mais aussi l'acquisition de lignes supplémentaires ailleurs en Europe.

Selon M. Yves PETROFF, un inconvénient majeur de cette solution, si elle était possible, serait que la communauté des chercheurs français ne disposerait plus de ressources exclusivement nationales en rayonnement synchrotron. Mais au surplus, un tel scénario, au demeurant coûteux, est surtout est illusoire quant au nombre de lignes réellement disponibles en Europe.

2.1. Un coût réel supérieur aux estimations actuelles pour les seules lignes sur DIAMOND

Le coût de la contribution française à DIAMOND, tel qu'il est estimé à l'heure actuelle, est, selon M. Yves PETROFF, totalement erroné.

Le montant de 350 millions de francs à la charge de la France a été présenté au départ comme couvrant la totalité des dépenses. Puis M. Paul CLAVIN a indiqué que le coût de l'anneau de stockage n'était pas facturé à la France, ce que, comme on pouvait s'y attendre, le Royaume Uni a démenti. Le directeur de la recherche a alors indiqué que le montant de 350 millions correspondait au seul coût des lignes. Or cette évaluation n'a pas davantage de réalité économique.

Le coût réel d'investissement d'une ligne de lumière pour la biologie est selon M. Yves PETROFF de l'ordre de 20 à 24 millions de francs.

A cette somme, il faut rajouter les dépenses en personnel pendant les 4 années qui séparent la construction d'une ligne de la production de ses premiers résultats. Cette dépense correspond aux salaires de 6 personnes pendant 4 ans, soit 24 salaires annuels, à multiplier par deux pour tenir compte du coût de la vie au Royaume Uni.

Le ministère de la recherche a par ailleurs indiqué qu'il ne s'agissait plus d'obtenir 7 lignes mais 12 lignes. Au demeurant, sur un plan technique, ceci n'a pas de sens selon M. PETROFF.

La France serait candidate pour obtenir 6 onduleurs et entendrait construire 2 lignes par onduleurs. Il est certes possible de diviser un faisceau mais tout changement de longueur d'onde affecte les deux faisceaux simultanément. Il conviendrait donc pour 12 lignes de disposer de 6 onduleurs et de 6 aimants de courbure.

2.2. L'absence de lignes de lumière disponibles ailleurs en Europe

Le plan du ministère de la recherche comprend, outre la participation dans DIAMOND, l'achat de 3 lignes sur ELETTRA à Trieste et de 3 autres lignes sur BESSY II à Berlin. S'agissant de BESSY II, il est à remarquer que son énergie de 1,9 GeV est insuffisante pour disposer sans difficulté de faisceaux sur onduleurs dans la gamme des rayons X.

Or, selon M. PETROFF, il n'existe en réalité aucune ligne à vendre ou à louer, ni à Trieste, ni à Berlin.

Par ailleurs, le synchrotron ANKA de Karlsruhe, qui a été construit contre l'avis du ministère de la recherche allemand, et qui ne parvient à atteindre son objectif d'une contribution de partenaires industriels à hauteur de la moitié de son budget, ne constitue pas une solution pour la France, dans la mesure où cette installation est un synchrotron de 2^{ème} génération.

3. " L'inadéquation de la solution 7 lignes sur DIAMOND + un synchrotron de 1,5 GeV en France "

M. Georges CHARPAK ayant fait état du scénario actuellement étudié par le ministère d'une machine française de 1,5 GeV complétant les 7 lignes de DIAMOND, M. Yves PETROFF a estimé qu'une telle solution présenterait de graves inconvénients.

3.1. La répartition des lignes en fonction des disciplines

L'attribution à la biologie de la totalité des lignes que la France pourrait décider d'acquérir sur DIAMOND, serait, selon M. PETROFF, une aberration. Les besoins en rayons X des sciences physiques ne sauraient en effet être négligés.

En tout état de cause, il est indispensable d'assurer une diversité dans les méthodes d'analyse.

3.2. Les inconvénients pour la recherche

Le premier inconvénient serait d'obliger à délocaliser en Angleterre toutes les ressources en rayons X pour la biologie. Une machine à 1,5 GeV ne serait d'aucune utilité pour satisfaire la demande de résolution de structures de protéines. Bien entendu, une telle machine peut être poussée en énergie grâce à des onduleurs, comme cela a été fait à Berkeley mais une telle solution est extrêmement coûteuse.

Quant à la volonté de coopération des Britanniques avec la recherche française, elle peut être mise en doute, en raison de l'importance mondiale de l'industrie pharmaceutique du Royaume Uni et de son souci de garder son rang.

3.3. Une solution ne générant aucune économie par rapport à SOLEIL

Il a été indiqué, au cours d'une audition réalisée par les Rapporteurs de l'OPECST, que le coût d'un synchrotron de 1,5 GeV pourrait être 4 fois inférieur à celui de SOLEIL.

Selon M. Yves PETROFF, cette estimation n'a pas de fondement. L'économie réalisée en passant d'une énergie de 2,5 GeV à une énergie de 1,5 GeV serait d'un facteur 1,3.

Au final, selon M. PETROFF, la construction d'une machine de 1,5 GeV et l'acquisition de lignes sur DIAMOND sera plus onéreuse que la construction de SOLEIL, avec un potentiel très inférieur et un surcoût de l'ordre de 700 millions de francs.

4. " Une même machine en deux exemplaires, l'une en France et l'autre au Royaume Uni "

La première recommandation de M. Yves PETROFF en termes de solutions est de reprendre l'avant-projet détaillé SOLEIL, tout en augmentant son énergie à 3 GeV.

La deuxième recommandation est de proposer au Royaume Uni la construction d'une machine identique en deux exemplaires, l'un situé en France et l'autre au Royaume Uni, avec une planification sur 10 à 20 ans.

4.1. Des économies d'échelle considérables

La duplication est la meilleure méthode pour parvenir à réaliser des économies, tout en satisfaisant les besoins des deux communautés scientifiques française et anglaise.

La commande groupée et planifiée dans le temps de séries importantes d'équipements de haute technologie serait de nature à générer des économies considérables. De multiples exemples à l'ESRF l'ont démontré.

Ainsi, un onduleur avec tous ses équipements périphériques, revient à l'ESRF à environ cent mille euros par mètre, parce que les commandes sont faites pour une quinzaine d'exemplaires à livrer sur plusieurs années. Au contraire, l'APS de Berkeley qui passe des commandes à l'unité, dépense un million de dollars pour un seul onduleur, sans ses équipements liés. La réalisation de ce type d'équipement nécessite en effet des outils spécifiques extrêmement onéreux, impossibles à amortir sur une seule unité.

Par ailleurs, la commande groupée de détecteurs pour la biologie dont le coût unitaire moyen atteint 4,5 millions de francs, permettrait d'obtenir des rabais importants.

Il est très probable que le clone d'un synchrotron devrait coûter 20 % moins cher sur l'investissement et le fonctionnement que le synchrotron originel.

M. Jean GALLOT a fait remarquer qu'une nouvelle négociation avec le Royaume Uni pour harmoniser les caractéristiques des deux synchrotrons et dégager des économies d'échelle, risquerait de retarder encore le processus, alors qu'il y a une urgence extrême à lancer le projet SOLEIL. Pour M. Yves PETROFF, une discussion scientifique et technique de ce type ne rajouterait qu'un délai très court, de l'ordre de deux mois.

En l'occurrence, la gestion sur 10 ans s'impose pour tous les grands équipements car elle génère des économies substantielles.

Sur la base de ces remarques, M. Yves PETROFF estime que le coût de deux machines clonées en France et en Grande-Bretagne devrait, selon toute probabilité, être inférieur à celui du scénario " 7 lignes sur DIAMOND + un synchrotron en France de 1,5 GeV ".

4.2. Les économies provenant de l'arrêt du LURE assorti du lancement d'un nouveau synchrotron

Pour M. PETROFF, non seulement la jouvence permanente et indispensable du LURE est onéreuse mais l'exploitation même de la machine est dispendieuse. Ainsi le remplacement d'au moins deux klystrons coûte chaque année au moins deux millions de francs et demi. Par ailleurs, le fonctionnement de l'injecteur du LURE, qui a 50 ans d'âge, requiert l'intervention de 27 personnes, alors que celui de l'ESRF est actionné par deux personnes.

Plus longue à mettre en place sera la solution de remplacement et plus important sera le surcoût.

4.3. L'intérêt d'une planification à long terme

Pour M. PETROFF, il suffit de concevoir un synchrotron avec une flexibilité suffisante pour garantir son avenir. L'horizon de temps dans ce domaine doit être supérieur à 20 ans.

Au vrai, il convient de ne pas faire d'économies sur la taille de l'anneau et le nombre de ses sections droites. Il est alors possible de rénover et d'augmenter la puissance de la machine et le nombre de ses lignes de lumière sans difficulté majeure. C'est ce qui est fait à Stanford sur le synchrotron SSRL, dont la rénovation est en cours.

4.4. Inverser les positions dans la négociation

Sur la base de l'APD SOLEIL, la construction de la machine française pourrait débuter dans l'année, après deux mois de négociation avec le Royaume Uni pour aboutir à la définition des équipements communs. Selon M. Yves PETROFF, l'avant-projet détaillé SOLEIL est exportable, les spécificités nationales n'intervenant, le cas échéant, qu'au niveau de logiciels voire d'équipements périphériques aisément substituables.

La construction du synchrotron britannique débiterait un peu plus tard, une fois son adaptation – à la marge – faite aux besoins spécifiques de la communauté scientifique britannique. Il serait bien entendu proposé au Royaume Uni d'acquérir des lignes de lumière sur le synchrotron français pour la période séparant l'entrée en service de celui-ci et celle de la machine anglaise.

En outre, pour rompre l'isolement de la France dans sa position de demanderesse, et pour diminuer les coûts de l'investissement, d'autres pays seraient invités à faire partie de la réalisation française, en particulier l'Espagne qui consacre des sommes importantes à la formation de ses chercheurs au rayonnement synchrotron au LURE.

VI – La forme juridique et le statut des personnels

1. Le statut juridique de différents synchrotrons

L'ESRF, comme ELETTRA (Trieste) et BESSY (Berlin), est placé sous le statut de société civile.

2. Le statut des personnels de l'ESRF

Les salariés de l'ESRF sont pour certains des personnels à statut, détachés pour une période limitée dans le temps, et pour d'autres des personnels recrutés directement par l'établissement. C'est bien sûr l'ESRF qui rémunèrent l'ensemble de ses salariés, y compris les personnels détachés.

2.1. La coexistence de personnels à statuts détachés et de personnels permanents

La grille des rémunérations de l'ESRF est semblable à celle du CEA. Les personnels étrangers bénéficient d'une prime d'expatriation de 15 %. La durée du travail officielle est de 40 heures par semaine.

L'installation est arrêtée pour maintenance 3 semaines en juillet et 3 semaines en hiver. Son fonctionnement s'étend sur des périodes de 8 semaines où les installations sont opérationnelles 24h sur 24, périodes séparées par une semaine d'arrêt pour maintenance et travaux.

Le niveau et la disponibilité exigés des personnels de l'ESRF sont élevés. La structure étant réputée user rapidement ses employés et un taux de rotation élevé étant jugé utile pour renouveler les compétences et les diffuser dans les laboratoires d'utilisateurs, la durée moyenne de présence à l'ESRF est en moyenne de 5 ans.

Parmi les chercheurs, 25 % ont des postes permanents et les autres des contrats de 5 ans.

L'âge moyen des salariés de l'ESRF, toutes catégories confondues, est de 34,5 ans.

Selon M. Yves PETROFF, le niveau de compétences des personnels de l'ESRF est de tout premier niveau mondial, dans toutes les disciplines.

En tout état de cause, M. Yves PETROFF estime que le statut de la fonction publique n'est pas incompatible avec le management efficace d'une installation comme un synchrotron, à condition que des dérogations soient possibles sur certaines dispositions.

A titre d'exemple, on peut citer les achats de matériels, les remboursements de frais de participation à des congrès scientifiques, le recrutement de personnels intérimaires, le pourcentage des primes pour heures supplémentaires dans la rémunération totale.

Si la durée de fonctionnement du LURE est inférieure à celle des autres synchrotrons, c'est parce que les agents travaillant la nuit ne peuvent avoir des primes supérieures à 30 % de leur salaire. On peut noter que des solutions existent dans certaines administrations pour s'affranchir de cette contrainte.

2.2. La nécessité d'une grande réactivité

La structure de gestion d'un synchrotron doit désormais faire preuve d'une grande souplesse et d'une grande réactivité. C'est ainsi que l'ESRF a mis en place pour ses clients payants, un encadrement particulier et, en conséquence, a embauché des ingénieurs avec la rapidité adéquate.

De même, le recours à des personnels intérimaires lui est possible en cas d'urgence.

Par ailleurs, les recettes tirées de ses ventes propres doivent pouvoir être gardées par la structure, afin de nourrir les besoins d'investissement. Au demeurant, si ces recettes étaient rétrocédées aux pays membres, elles viendraient immédiatement en déduction des subventions, ce qui compromettrait la modernisation permanente et nécessaire de l'équipement.

3. La fiscalité et les charges sociales de la recherche

Sans que ce constat ne puisse déboucher à lui seul sur des conclusions opérationnelles, la moindre utilisation du rayonnement synchrotron par l'industrie européenne provient aussi des coûts d'accès : les cotisations patronales sont de fait de 33 % aux Etats-Unis, contre 50 % en France, ce qui renchérit les heures d'utilisation payantes.

Par ailleurs, les entreprises américaines reçoivent des crédits d'impôt en contrepartie de leurs investissements dans la construction et l'équipement de lignes de lumière sur des synchrotrons comme ceux d'Argonne et de Berkeley. Ainsi, les deux premières lignes de lumière du synchrotron APS d'Argonne ont été financées par un groupement de 10 groupes pharmaceutiques, dont 4 laboratoires européens.

Dans ces conditions, il n'est pas à exclure que les industries notamment pharmaceutiques implantent leurs laboratoires aux Etats-Unis, compte tenu de l'importance du rayonnement synchrotron pour leur recherche et des moindres coûts qui y sont associés. Il est à noter que Novartis et Hoechst l'ont récemment fait.

VII – La localisation

Selon Yves PETROFF, il est indispensable que la France dispose d'un nouveau synchrotron pour sa communauté scientifique nationale. Il faut aussi que ce nouvel équipement soit implanté dans une zone à fort développement scientifique et bien desservi par un ensemble de transports nationaux et internationaux.

Il faut enfin une planification à long terme non seulement pour l'évolution du synchrotron mais également pour celle de la zone concernée.

1. L'implantation possible sur un site sans synchrotron

S'agissant de la question de savoir si l'on peut construire un synchrotron dans une région qui n'en possède pas déjà un, M. Y. PETROFF remarque que l'on est parti de rien à Grenoble.

Le fait que le triangle Lyon-Grenoble-Genève possède un tissu scientifique et industriel de premier niveau dans les hautes technologies a toutefois facilité la construction du synchrotron et joue encore un grand rôle dans les succès de l'ESRF, le rôle pionnier et toujours moteur du CERN devant être souligné à cet égard.

2. L'importance de transports internationaux de qualité

Une autre condition de base pour le choix de la localisation est la qualité des transports nationaux et internationaux.

Le synchrotron ELETTRA à Trieste souffre de la mauvaise desserte de la ville. L'aéroport le plus proche est celui de Milan, un aéroport au demeurant surchargé, avec des retards fréquents, les liaisons Milan-Trieste étant au demeurant peu commodes. De nombreux chercheurs italiens préfèrent souvent aller dans un autre pays européen, alors qu'ELETTRA est l'un des meilleurs centres au monde. La région de Trieste possède pourtant des équipes de chercheurs théoriciens de très haut niveau. Au final, les chercheurs italiens ne consomment que 40 % du temps de faisceau d'ELETTRA, les 60 % restants étant utilisés par les chercheurs étrangers.

Pour certaines applications comme celles de la biologie structurale, on peut toutefois penser, selon M. Yves PETROFF, que les clients d'un synchrotron pourront à terme envoyer des échantillons et récupérer leurs résultats par l'intermédiaire des réseaux de transmission de données à hauts débits.

3. L'importance d'une forte densité en laboratoires de recherche

L'implantation d'un synchrotron doit impérativement se faire dans une zone géographique possédant des centres scientifiques et universitaires.

Cet impératif est particulièrement vrai pour les applications du rayonnement synchrotron aux sciences du vivant, où une telle configuration permet d'accélérer le travail des biologistes et d'abaisser les coûts des équipements et de leur utilisation.

Implanté dans le polygone scientifique de Grenoble, l'ESRF est à un jet de pierre de l'EMBL (European Molecular Biology Laboratory), de l'ILL (Institut Laue-Langevin) et de l'IBS (Institut de Biologie Structurale) et à quelques minutes des laboratoires universitaires. Il peut se produire que des biologistes ayant retenu un créneau horaire à l'ESRF, se désistent quelques heures avant le début de celui-ci, en raison, par exemple, d'un échec rencontré dans un processus de cristallisation. L'ESRF fait alors un appel à candidature dans les laboratoires du polygone, offrant à l'improviste, un temps de faisceau, ce qui est instantanément accepté.

Par ailleurs, la proximité améliore les échanges de vues entre les chercheurs, par le biais de rencontres informelles ou par celui de séminaires qui peuvent être fréquemment organisés en minimisant les pertes de temps. A cet égard, la contiguïté est indispensable. Des temps de transport d'une heure annulent le bénéfice d'une proximité qui n'est alors qu'apparente. Ceci est observé dans le cas de l'ESRF dont les échanges sont moins importants avec les laboratoires situés à Crolles qu'avec ceux du polygone scientifique.

La proximité de laboratoires permet d'offrir aux utilisateurs de l'ESRF des facilités expérimentales, comme par exemple pour la préparation d'échantillons dans le domaine de la microélectronique.

La localisation d'un synchrotron au sein d'un ensemble de laboratoires peut enfin diminuer les coûts de création de nouveaux services mis à la disposition des utilisateurs et à de nouvelles collaborations sur le site.

D'ores et déjà, la création d'un laboratoire commun entre l'EMBL et l'ESRF permet aux utilisateurs du synchrotron de bénéficier des chambres froides de l'EMBL et de l'expertise de ce dernier dans la manipulation de virus et d'autres échantillons dangereux. Par ailleurs, pour répondre à la demande des laboratoires Glaxo Wellcome, Aventis et Novartis, l'ESRF étudie à l'heure actuelle la création sur le polygone scientifique de Grenoble d'un laboratoire dédié à la cristallisation des protéines et à l'étude des structures, en collaboration avec l'EMBL et l'IBS.

En définitive, la proximité géographique d'un synchrotron rend facile le contrôle ou le "*screening*" des cristaux de protéines dont on ne peut véritablement connaître la qualité avant de la tester en vraie grandeur. Certes, l'ESRF envisage de réaliser par ses propres moyens les manipulations de "*screening*" d'échantillons envoyés par les utilisateurs mais la résolution complète d'une structure semble exiger encore pour longtemps la présence des producteurs.

Ainsi que le souligne M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, l'intérêt d'un nouveau synchrotron pour tous les laboratoires du Génopôle, plaiderait en faveur de l'implantation de ce dernier à Evry, si la décision était prise de construire une machine en France et de sélectionner l'Île-de-France à cet effet.

VIII – Les coopérations européennes nécessaires

Selon M. René TRÉGOUËT, Sénateur, rapporteur, un Congrès relatif aux très grands équipements en Europe doit se tenir à l'automne 2000.

Ce Congrès devrait mettre en évidence un consensus sur la nécessité d'une coopération européenne pour ces installations. Il est clair que la France doit être en accord avec cette orientation.

M. Georges CHARPAK a indiqué que si la duplication permettait de faire deux synchrotrons avec des économies substantielles et si plusieurs participations européennes pouvaient être trouvées, alors le programme de deux machines clonées pourrait peut-être rencontrer l'intérêt du ministère de la recherche.

III – Visite du SRS – Daresbury

- **21 février 2000**
- **–entretiens avec des responsables du Wellcome Trust – Londres**
- **- 21 février 2000**
- **– visite du Rutherford Appleton Laboratory – Didcot**
- **– 22 février 2000**

Le Royaume Uni dispose à Daresbury, près de Manchester, du synchrotron SRS de 2^{ème} génération, une machine à la fois saturée et dépassée techniquement.

Le projet DIAMOND d'une source de 3^{ème} génération, lancé par le Gouvernement britannique pour le remplacer, a rencontré en 1998 l'intérêt du Wellcome Trust, une fondation privée d'aide à la recherche ("*Charity Trust*"), puis celui du Gouvernement français début 1999, de sorte que le ministère de la recherche a pu annoncer le 2 août 1999 sa participation à DIAMOND.

Lors de leur déplacement au Royaume Uni les 21 et 22 février 2000, les Rapporteurs ont visité le synchrotron SRS de Daresbury à un moment où la décision sur l'implantation de DIAMOND sur place ou au contraire à Didcot, près d'Oxford, n'était pas encore connue.

Un haut responsable du Wellcome Trust leur a ensuite présenté à Londres les grandes lignes de la stratégie de cette fondation d'aide à la recherche dans les sciences du vivant.

Enfin, la visite du principal site du Central Laboratory for the Research Councils (CRLC) a fait apparaître en pleine lumière la stratégie

offensive des pouvoirs publics britanniques dans le domaine des très grands instruments.

1. SRS – Daresbury

Le synchrotron SRS de Daresbury, s'il est promis à être remplacé par DIAMOND, devrait encore être en service pendant 5 à 10 ans, tant les besoins d'accès sont importants au Royaume Uni. Quel que soit le choix fait entre Daresbury et Didcot pour la construction de DIAMOND, la source SRS devrait à l'avenir servir davantage l'activité scientifique locale, alors que la production de photons pour des chercheurs visiteurs y est pour le moment prédominante.

1.1. Une source de 2^{ème} génération de qualité

La construction de SRS a débuté en 1975 et s'est achevée 6 ans plus tard en 1981.

Le synchrotron SRS est un synchrotron de 2^{ème} génération d'une énergie de 2 GeV, comportant 41 postes expérimentaux pour 16 cellules. Le tableau suivant donne la répartition des postes expérimentaux selon les gammes de longueur d'ondes.

Tableau 13 : Répartition des postes expérimentaux de SRS

gamme de longueurs d'onde	nombre de postes expérimentaux
rayons X durs	24
rayons X mous	5
ultraviolet sous vide et longueurs d'onde supérieures	12
total	41

C'est cette répartition de près de 60 % de postes expérimentaux pour les rayons X durs qui est actuellement proposée aux quelques 2000 utilisateurs de SRS. Parmi ceux-ci, on compte 10 à 15 % de chercheurs étrangers. Le synchrotron SRS fonctionne sur une durée annuelle de 5500 heures de faisceau.

La biologie occupe la première place au SRS en nombre d'expériences réalisées, soit 32 % du total. Toutefois, compte tenu de la rapidité de réalisation des manipulations et des clichés de cristallographie, elle ne

représente que 17 % du nombre total de (jours x instruments). La chimie représente avec 21 % le deuxième poste pour le nombre d'expériences réalisées, ceci correspondant à 28 % du nombre de (jours x instruments). Les sciences des matériaux assurent 21 % du nombre d'expériences.

On peut constater au SRS, comme pour tous les synchrotrons visités, que la demande de temps d'accès est largement supérieure aux disponibilités. Ainsi, en ce qui concerne la chimie, ce sont seulement 34 % des projets qui sont acceptés, faute de lignes de lumière disponibles.

SRS contribue à l'élucidation d'un nombre important de structures de protéines, environ 100 par an. C'est sur ce synchrotron qu'a été réalisée l'identification de la structure de la F1-ATPase, un enzyme clé qui catalyse la conversion d'énergie chimique en ATP. La détermination de cette structure a permis de comprendre le mécanisme de stockage d'énergie dans toutes les cellules vivantes, des travaux qui ont valu à John Walker le Prix Nobel.

Au total, 700 à 800 publications sont faites chaque année sur la base d'expérimentations réalisées avec SRS.

SRS a reçu des améliorations constantes au cours du temps afin, notamment, de gagner en brillance et de produire des rayons X plus durs. A cet effet, des " *wigglers* " simples et des " *wigglers* " multipôles ont été ajoutés en 1992, puis des onduleurs quelques années plus tard. En 1994, un dispositif de contrôle digital automatique de la stabilité du faisceau a permis d'améliorer le fonctionnement de la source de rayonnement synchrotron.

Les efforts les plus récents concernent la cristallographie des protéines (2 postes expérimentaux supplémentaires), les études de surface, les études des nanoclusters et des molécules (2 postes additionnels) et les fabrications de matériaux (1 poste en plus).

La vocation générale du SRS est d'être orienté vers le service aux utilisateurs. Ceci tient en partie à l'appartenance de cette installation au Central Laboratory for the Research Councils (CLRC), organisme dont la fonction est de construire et de gérer des grands instruments mis au service des organismes de recherche.

Si une assistance rapprochée est fournie sur le site aux utilisateurs, en revanche l'environnement de recherche est moins développé qu'au LURE, avec un nombre beaucoup plus réduit de laboratoires d'application travaillant au contact direct de la machine.

Bien qu'ayant mené un combat farouche pour l'implantation de DIAMOND sur le site de Daresbury, la direction et les chercheurs sont apparus pessimistes quant aux chances de la région de Manchester de remporter la victoire.

Le Wellcome Trust est en effet désireux de concentrer ses efforts sur la région d'Oxford – Cambridge où se trouve le Sanger Centre, le principal centre mondial de génomique qu'il finance entièrement.

En outre, le CLRC pèse de tout son poids pour concentrer ses investissements au Rutherford Appleton Laboratory.

Face à ces deux organismes assurant le financement de l'opération, l'importance de la région de Manchester, les nécessités du développement économique et celles de l'université locale ne devraient être que des paramètres de second ordre dans la décision.

En conséquence, la direction du SRS s'attend que DIAMOND ne soit pas installé à Daresbury. Dans ces conditions, quelles peuvent être les perspectives de SRS ?

La nouvelle direction entend développer les applications scientifiques autour de la machine pour en rapprocher le fonctionnement de celui du LURE. En réalité, le SRS devra rester en fonctionnement 6 à 7 ans, jusqu'à l'entrée en service de DIAMOND.

Le soutien de la région de Manchester devrait permettre d'atteindre cet objectif.

1.2. Les prévisions des besoins en rayonnement synchrotron

Pour les responsables du SRS, la prévision des besoins ne peut se faire qu'en tendance. Plusieurs évolutions majeures sont très probables.

La première évolution correspond à la croissance de la demande d'études dynamiques, qui va concerner toutes les disciplines. A cet égard, la pulsation intrinsèque du rayonnement synchrotron apporte une solution performante pour "*filmer*" tous types de phénomènes. Le rayonnement synchrotron devrait donc permettre de suivre des phénomènes physiques, chimiques ou biologiques en cours d'évolution.

La deuxième tendance est celle de l'utilisation du rayonnement dans des conditions de plus en plus extrêmes. Ceci vaut tant pour la possibilité d'étudier des échantillons ou des cristaux de taille de plus en

plus réduite que pour des analyses réalisées à des températures et des pressions élevées.

Le troisième devrait provenir d'une part de l'automatisation de certaines manipulations sur les lignes de lumière, comme la mise en place des échantillons, et d'autre part du transfert des données à distance, par exemple pour la récupération des diagrammes de diffraction.

1.3. La genèse et les zones d'incertitude de DIAMOND

En 1993, dans un document intitulé le "*Wolfson Review*", les pouvoirs publics britanniques esquissent, en fonction des estimations des besoins d'accès, l'évolution souhaitable de leurs ressources en rayonnement synchrotron.

C'était un dispositif à trois étages qui était envisagé. L'étage supérieur devait être constitué par la participation de 14 % du Royaume Uni dans l'ESRF dont l'énergie de 6 GeV assure de bonnes performances dans le domaine des rayons X. L'étage intermédiaire devait correspondre au projet DIAMOND, une machine dont l'énergie serait voisine de 3 GeV. Le premier étage aurait été une machine de basse énergie intitulée SINBAD.

En 1994, l'intérêt de DIAMOND est confirmé par un comité scientifique. En 1997, le rapport intitulé "*Red Book*" précise les contours du futur DIAMOND, en établissant son énergie à 3 GeV, son nombre de "*cellules*" à 16 et sa circonférence à 345 m. En 1998, une variante optionnelle du projet porte le nombre de cellules à 20. En 1999, les conclusions d'un panel scientifique international ouvrent le choix de l'énergie à 3 ou 3,5 GeV et le nombre de cellules à 16, 20 ou 24, selon le tableau suivant.

Tableau 14 : Options du projet DIAMOND – 1999 –

nombre de cellules	circonférence de l'anneau (m)	brillance pour des photons de 13 keV	émittance
16	345	$7 \cdot 10^{18}$	5,0
20	400	$2 \cdot 10^{19}$	2,6

24	480	5.10^{19}	1,5
----	-----	-------------	-----

Le calendrier de la construction de DIAMOND, tel qu'exposé par les spécialistes du SRS, montre qu'une année de travail est encore nécessaire pour la définition précise de la machine dans le cadre d'un avant-projet détaillé analogue à celui de SOLEIL. Le coût de ce travail est estimé à 2 millions de £ par les spécialistes de Daresbury.

Ensuite, il faudrait 4 ans et demi de construction pour disposer de 12 lignes de lumière opérationnelles.

Dans l'étude des dimensions de la future machine, la prise en compte des besoins des différentes parties prenantes est bien entendu capitale. On trouvera ci-dessous les hypothèses évoquées à Daresbury.

Tableau 15 : Hypothèses de nombres de cellules évoquées par les responsables du SRS

besoins	Rappel situation actuelle (SRS) (cells)	Diamond hypothèse basse (cells)	Diamond prévision (cells)
Royaume Uni	14	10	12
Wellcome Trust	0	3	3
France	0	5	7
cellules machines	2	2	2
Total opérationnel	16	20	24

Une évaluation du coût d'une ligne de lumière a été donnée lors de la visite du SRS. Ce coût hors salaires est estimé à 3,5 millions de £, en comptant le dispositif d'insertion, la tête de ligne et l'instrumentation.

Des différents échanges avec les spécialistes de Daresbury, il apparaît probable que l'énergie de DIAMOND soit fixée à 3,2-3,5 GeV, pour un

nombre de cellules (aimant de courbure et dispositifs d'insertion) égal à 20 ou 24.

Au vrai, les scientifiques de Daresbury considèrent unanimement comme insuffisant le chiffre de 10 et même de 12 lignes promis à la recherche britannique, compte tenu de la montée des besoins en particulier dans la biologie structurale.

En tout état de cause, DIAMOND devrait être une machine dédiée à la cristallographie des protéines, avec une évolution voulue vers une exploitation industrielle grâce à la robotique et à l'informatique.

Ce sont les sciences du vivant et l'enjeu scientifique et économique de la résolution systématique des structures des protéines qui semblent incontestablement à la base des décisions prises ou restant à prendre.

1.4. La coopération avec la France, vue par la base

Selon les indications recueillies auprès des spécialistes des synchrotrons rencontrés autour de la source SRS de Daresbury, les exigences scientifiques auxquelles doit répondre un synchrotron national sont différentes au Royaume Uni de ce qu'elles sont en France.

Une autre raison puissante milite en faveur de deux "*designs*" différents pour la machine française et la machine britannique.

Il s'agit de la volonté de la communauté britannique d'utiliser à plein ses compétences en ingénierie des synchrotrons pour définir DIAMOND, une volonté exprimée avec le net souci de conserver ses prérogatives.

Les responsables de Daresbury estiment toutefois possible une concertation avec la France, notamment pour la planification des commandes qui pourrait permettre des économies d'échelle de 10 à 20 %.

En outre, un schéma de participations croisées de la France sur DIAMOND mais aussi du Royaume Uni sur SOLEIL pourrait présenter l'intérêt de permettre l'accès aux meilleures technologies dans l'ensemble des domaines d'utilisation.

2. Le Wellcome Trust

C'est le Professeur Sir Michael Rutter, " *Deputy Chairman* " du " *Board of Governors* " du Wellcome Trust qui a reçu la délégation de l'Office et répondu à ses questions.

2.1. La puissance du Wellcome Trust dans le financement de la recherche

Le Wellcome Trust, créé en 1936, est un " *Charity Trust* " britannique qui dispose d'un actif de 130 milliards de francs. Cet actif est constitué principalement de valeurs mobilières, dont 4,7 % constitués d'actions du laboratoire Glaxo-Wellcome. Les organes de direction du Trust et les comités de programme comprennent des scientifiques britanniques et américains en quasi-exclusivité.

L'activité du Wellcome Trust est l'octroi de subventions à la recherche, principalement dans les domaines de la génétique, des neurosciences et des maladies infectieuses. Ce " *Charity Trust* " intervient pour financer des infrastructures (bâtiments universitaires, centre de recherche), des équipements et pour assurer des compléments de salaires ou offrir des bourses.

Les subventions à la recherche distribuées par le Wellcome Trust ont représenté 4,4 milliards de francs en 1998 et 6,6 milliards de francs en 1999. S'il développe une action internationale, le Trust s'interdit de travailler aux Etats-Unis pour des raisons juridiques liées à son histoire. Au demeurant, les seuls laboratoires français bénéficiant de subventions du Wellcome Trust sont ceux qui travaillent sur des projets communs avec des laboratoires britanniques.

Libre de toute influence économique et politique, le Wellcome Trust est toutefois engagé dans un partenariat à long terme avec le Gouvernement britannique. Un total de près de 8 milliards de francs a déjà été investi par le Trust dans la rénovation des bâtiments universitaires de différentes facultés des sciences britanniques.

Le partenariat avec les gouvernement britannique et français sur le synchrotron DIAMOND s'inscrit parfaitement dans le dessein du Wellcome Trust d'accroître ses efforts dans les sciences de la vie et témoigne de son intérêt pour un approfondissement de la collaboration entre physiciens et biologistes autour d'une machine de ce type.

L'intervention du Wellcome Trust dans la recherche sur les sciences de la vie est multiforme. On retiendra en premier lieu les travaux qu'il

finance sur la génétique de maladies multifactorielles complexes, au Centre de génétique humaine de l'université d'Oxford. On retiendra en second lieu son engagement dans la génomique qui constitue l'une de ses toutes premières priorités.

Le Sanger Centre pour le décryptage du génome, implanté à Hinxton près de Cambridge, qu'il finance entièrement, aura effectué près du tiers des travaux de décryptage effectués dans le monde. Le total des subventions versées par le Wellcome Trust dans le séquençage du génome humain a atteint plus de 2 milliards de francs en 1999. La nouvelle étape de la génomique passe sans aucun doute, pour le Wellcome Trust, par l'identification des fonctions des différentes protéines, notamment grâce à la résolution de leurs structures.

La politique affichée par le Wellcome Trust est de financer exclusivement des recherches publiées et donc mises à la disposition de la communauté scientifique mondiale.

Toutefois, on peut noter, dans les publications de ce Charity Trust, la création par ses soins d'une société destinée à aider les chercheurs qu'il subventionne à protéger leurs découvertes. Sa position officielle est la suivante : *" l'objectif du Trust est simplement de faire en sorte que les retombées médicales augmentent le plus rapidement possible. La meilleure façon d'y parvenir est la publication immédiate des résultats. Mais ceci ne veut en aucun cas dire que le Trust est contre la prise de brevet ; au contraire il conseille activement ses chercheurs sur la meilleure manière de capturer la propriété intellectuelle "*.

A cet effet, en juin 1998, la société BioMedica Limited a été fondée en tant que filiale à 100 % du Wellcome Trust : *" cette filiale travaillera avec les chercheurs dont les travaux sont subventionnés par le Wellcome Trust pour protéger et exploiter la recherche subventionnée par le Trust "*.

Au total, rien ne permet de penser que les orientations du Wellcome Trust dépendent étroitement du 3^{ème} laboratoire pharmaceutique mondial, Glaxo Wellcome, dont la fusion a par ailleurs été annoncée récemment avec SmithKline Beecham.

En revanche, en raison du centrage de ses interventions sur le Royaume Uni et certains pays en développement, le Wellcome Trust apparaît bien, ce qui ne saurait être tenu pour illégitime, comme un instrument à l'intérieur de l'Europe qui profite essentiellement à la recherche britannique et de l'industrie pharmaceutique britannique.

2.2. L'implication du Wellcome Trust dans DIAMOND

Le Wellcome Trust s'est engagé à allouer 10 millions puis 100 millions de £ au projet DIAMOND, soit un total d'environ 1,2 milliard de francs.

Le Professeur Rutter a indiqué qu'il s'agit là d'une participation aux dépenses de construction et d'exploitation du nouveau synchrotron pour une participation de 3 cellules sur cette machine, la participation à l'investissement dans la construction s'élevant à hauteur de 70 millions de £. Au vrai, puisque les négociations sont en cours, il est difficile de déterminer avec précision les conditions de cette participation. En particulier, une variable clé est bien entendu celle de la durée d'exploitation considérée, 5, 10 ou 20 ans selon les calculs.

D'ailleurs, au cours de la séance du 15 décembre 1999 de la Commission de la science et de la technologie de la Chambre des Communes, le Dr. Michael Dexter, Directeur du Wellcome Trust, a indiqué que son organisation contribuerait de plus aux dépenses de fonctionnement.

D'autres chiffres ont été cités le 19 janvier 2000 par M. Stephen Byers, secrétaire au commerce et à l'industrie du Gouvernement Blair. Selon ce dernier, le Wellcome Trust prendrait à sa charge 16 % de la dépense totale de construction et de financement sur 20 ans, pour une contribution de 880 millions de francs. Selon ces mêmes déclarations de décembre 1999 et de janvier 2000, le projet DIAMOND présenterait un coût de construction de 1,65 milliard de francs et un coût de fonctionnement sur 20 ans de 3,8 milliards de francs.

Deux remarques doivent être faites à propos de ces incertitudes sur les chiffres.

La première est que le projet DIAMOND apparaît encore extrêmement mouvant, sur le plan de ses caractéristiques techniques et de la répartition de ses ressources.

La deuxième a trait à l'influence très forte que semble avoir le Wellcome Trust dans le processus de décision relatif au nouveau synchrotron, non pas en raison du poids de sa participation dans ce dernier, qui est réduite, mais en raison de son rôle majeur dans le financement de la recherche au Royaume Uni, en particulier dans la recherche universitaire.

C'est ainsi d'ailleurs que le Professeur Rutter a indiqué, sans crainte d'être démenti par une décision ultérieure, que sa préférence pour l'implantation de DIAMOND allait clairement au Rutherford Appleton Laboratory de Didcot, près d'Oxford, au lieu du site de l'actuel SRS à Daresbury.

Sur le plan des principes, le Professeur Rutter a toutefois indiqué que le partenariat projeté avec les gouvernements britannique et français serait fondé sur l'équilibre, avec des décisions prises à l'unanimité. En tout état de cause, la structure juridique, l'organisation fonctionnelle et les modes de décision ne sont pas encore discutées par les trois parties.

En réponse à une question de M. Christian CUVILLIEZ, Député, rapporteur, le Professeur Rutter a indiqué que le Wellcome Trust n'est en rien intéressé à prendre une participation dans un synchrotron complémentaire de DIAMOND qui pourrait être construit en France.

3. Le Laboratoire Central des organismes de recherche

Le CLRC (Central Laboratory for the Research Councils) ou Laboratoire Central des organismes de recherche, a pour but la promotion de la science et la technologie au Royaume Uni. Il fonde son action sur la mise en œuvre des très grands instruments britanniques, qu'il conçoit et exploite pour le compte de la communauté scientifique du Royaume Uni.

Les principaux chiffres caractérisant le CLRC sont indiqués au tableau ci-après.

Tableau 16 : Principales données relatives au CLRC

1999-2000	montants
budget annuel	110 millions de £
nombre d'employés en poste	1 728
nombre d'utilisateurs par an	12 000
valeur des actifs :	407 millions de

- installations et équipements	£
- terrains et bâtiments	113 millions de £

Le CLRC est un organisme indépendant, régi par une Charte royale et placé sous la tutelle du secrétaire au commerce et à l'industrie.

3.1. Un organisme concevant et exploitant les très grands instruments britanniques

Le budget annuel du CLRC, de 1,2 milliard de francs, est utilisé pour concevoir, construire et exploiter un ensemble de grands équipements.

La part de chacun de ces moyens est indiquée au tableau suivant.

Tableau 17 : Budget fonctionnel du CLRC pour 1999-2000 - Dépenses

1999-2000	millions de £	en % du total
ISIS (source de neutrons pulsés)	26	23,4
Rayonnement synchrotron	23	20,8
physique des particules	18	16,2
sciences et technologies spatiales	17	15,4
instrumentation	7	13
ingénierie	7	
laser de puissance	6	6,0
technologies de l'information	6	5,2
total		

Le CLRC dispose de trois implantations en Grande-Bretagne : le Rutherford Appleton Laboratory à Didcot (Oxfordshire), le Daresbury Laboratory près de Manchester et le Chilbolton Observatory à Stockbridge (Hampshire).

Il est intéressant de noter qu'en 25 ans, le CLRC qui était spécialisé au départ dans la physique des particules, a élargi son champ d'intervention à un ensemble de moyens d'analyse et d'observation allant de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Le CLRC a de fait pour fonction de gérer des " *Big Facilities* " pour la " *Big Science* " et pour la " *Small Science* ".

Par nature, le CLRC a la responsabilité de procurer des services de qualité aux organismes de recherche britanniques et de compléter ses ressources par des prestations de service pour l'industrie. C'est ainsi que 76 % de ses ressources sont tirées de contributions des Research Councils, qui administrent la recherche britannique, au demeurant sous des formes très différentes de nos grands organismes de recherche.

Tableau 18 : Budget fonctionnel du CLRC pour 1999-2000 – Recettes

1999-2000	millions de £	en % du total
1. Research Councils		
Ingénierie et sciences physiques	48	43,6
physique des particules et astronomie	24	21,8
environnement	6	5,5
biologie et biotechnologies	4	3,6
médical	2	1,8
total partiel	84	76,4
2. Autres ressources		
partenaires étrangers	8	7,3
Union européenne	4	3,6
universités britanniques	5	4,5

ministères	3	2,7
secteur privé	4	3,6
subventions directes	2	1,8
total partiel	26	23,6
total général	110	100,0

Les autres ressources du CLRC soit 24 % proviennent principalement de l'étranger (7 %) et des universités britanniques (4,5 %).

Le CLRC semble engagé dans des efforts de productivité importants ainsi que dans des efforts de marketing considérables pour attirer à lui de nouveaux utilisateurs et diversifier ses ressources budgétaires. A cette fin, son management veut manifestement se professionnaliser et s'orienter encore davantage vers la satisfaction des besoins des utilisateurs.

La contrepartie de cette orientation vers l'utilisateur est que le CLRC ne met en œuvre que des technologies confirmées et capables d'apporter des moyens d'analyse fiables sinon routiniers.

Cette constatation faite par l'un des responsables du centre de Didcot, est importante pour l'avenir de DIAMOND, dans la mesure où ce synchrotron pourrait être orienté davantage vers une utilisation selon des pratiques éprouvées que pour des recherches soumises à des aléas et pour des efforts d'innovation concernant la machine elle-même.

Au reste, l'orientation vers le marché ne semble pas représenter pour le moment une pierre philosophale, dans la mesure où les ressources apportées par le secteur privé ne représentent pour le moment que 3,6 % du total.

3.2. Le CLRC, une pièce essentielle de la stratégie scientifique britannique ?

La stratégie actuelle du CLRC est de concentrer au Rutherford Appleton Laboratory (RAL), situé à Didcot près d'Oxford, le plus grand nombre possible de très grands instruments, avec un management qui se préoccupe de valoriser les synergies entre différents types de grands instruments et de favoriser la créativité interdisciplinaire.

Aujourd'hui, les très grands instruments comme les sources de neutrons et les synchrotrons, ainsi que les lasers sont considérés par le CLRC comme des techniques complémentaires. Au demeurant, selon M. Andrew Taylor, directeur du laboratoire ISIS, les meilleurs chercheurs dans le domaine des études structurales, s'appuient à la fois sur les observations obtenues par les sources de neutrons et sur celles établies grâce au rayonnement synchrotron.

Le principal centre du CRLC est le Rutherford Appleton Laboratory (RAL), situé à Didcot près d'Oxford ; il s'agit d'un parc de très grands instruments avec un bureau d'étude commun et des spécialistes de toutes les technologies nécessaires (matériaux, électronique, informatique notamment)

Non seulement la source de neutrons ISIS et le laser de puissance Vulcain, ainsi que des laboratoires d'électronique, d'informatique et d'instrumentation sont implantés à Didcot, mais le RAL est candidat pour accueillir le futur synchrotron DIAMOND et la future source européenne de neutrons produits par spallation ESS (European spallation source).

Au reste, selon les déclarations recueillies au Rutherford Appleton Laboratory, le CLRC ne semble pas intéressé par une coopération avec la France pour la construction de SOLEIL.

En toute hypothèse, l'implantation de très grands instruments sur le sol national et leur concentration sur un même site semblent être devenues une pièce essentielle de la stratégie de recherche du Royaume Uni.

IV – Visite de DESY à Hambourg (Allemagne) – jeudi 24 février 2000

Lors de sa visite de DESY (Deutsche Elektronen-Synchrotron) à Hambourg, le jeudi 26 février 2000, la délégation de l'Office a été reçue par le Professeur Dr. Albrecht WAGNER, président du conseil de direction et par le Professeur Dr. Jochen SCHNEIDER, directeur du Hasylab.

DESY présente plusieurs caractéristiques remarquables. L'ampleur et le nombre des installations y sont exceptionnels. Celles-ci en effet ne comptent pas moins de 6 pré-accelérateurs, un anneau de stockage pour la physique des particules (HERA) d'une circonférence de 6,3 km, deux anneaux pour le rayonnement synchrotron (DORIS III et PETRA II) dont les circonférences atteignent respectivement 289 m et 2,3 km et une installation pilote pour un laser à électrons libres.

Par ailleurs, à DESY, la physique des particules ainsi que le développement et l'utilisation des synchrotrons sont conduits en parallèle, avec, au surplus, de très fortes interactions avec l'enseignement supérieur, ce qui impulse l'activité universitaire et industrielle de l'Allemagne du Nord.

DESY est à l'origine du projet de collisionneur linéaire TESLA dont l'ambition et les dimensions (30 km) appellent une coopération internationale renforcée, dont les prémisses existent aujourd'hui, la France figurant d'ores et déjà au premier rang des partenaires de l'Allemagne.

S'agissant du rayonnement synchrotron, DESY, non seulement apporte des services importants à une communauté d'utilisateurs très étendue mais s'attache aussi à préparer l'avenir, avec des travaux de pointe sur le complément au rayonnement synchrotron que constitueront les lasers à électrons libres.

1. Historique et organisation de DESY (Deutsche Elektronen-Synchrotron)

DESY (Deutsche Elektronen-Synchrotron) est créé en 1959 à Hambourg sous la forme d'une fondation de droit civil. En 1992, à la suite de la réunification des deux Allemagnes, l'Institut de physique des hautes énergies de Zeuthen lui est rattaché.

En termes d'historique et d'organisation, DESY se caractérise d'abord par une étroite coordination d'une part entre la recherche en physique des particules et d'autre part la recherche conduite avec et sur le rayonnement synchrotron.

Une autre caractéristique originale de DESY est la continuité des efforts, qui se traduit concrètement par la construction progressive d'installations nouvelles parfaitement articulées avec les équipements précédents.

1.1. Une organisation assurant le développement coordonné de la physique des particules et du rayonnement synchrotron

L'organe dirigeant opérationnel de DESY est le conseil de direction, chapeauté par un conseil administratif composé des représentants du Gouvernement fédéral et des Lander. Le conseil de direction bénéficie aussi de l'apport d'un Conseil scientifique.

Echelon suprême de direction, le conseil de direction rassemble l'ensemble des directeurs, avec à sa tête un président ("*Chairman of the Board of Directors*"). On retrouve ici la dimension collégiale de la décision, fréquente dans les organisations allemandes.

Au plan opérationnel, DESY est structuré en quatre grandes directions : accélérateurs, infrastructure, administration, recherche.

La direction de la recherche est quant à elle subdivisée en plusieurs départements :

- expériences de physique des hautes énergies
- théorie
- électronique
- technologies des détecteurs
- bibliothèque et documentation
- expériences "*sur et avec*" le rayonnement synchrotron et assistance aux utilisateurs
- biologie structurale
- lasers à électrons libres : installation et expériences.

En matière de rayonnement synchrotron, il s'agit à DESY non seulement de mettre en œuvre le rayonnement synchrotron pour des recherches relatives à toutes les disciplines mais aussi de conduire des recherches relatives au rayonnement synchrotron lui-même.

On retrouve par ailleurs au niveau de la direction de la recherche, un comité scientifique tant pour la physique des particules que pour le rayonnement synchrotron.

Le budget de DESY-Hambourg s'est élevé à 260 millions de DM en 1998, soit 872 millions de francs, et à 266 millions de DM en 1999, soit 892 millions de francs. Celui de DESY-Zeuthen est d'environ 10 % de celui de DESY- Hambourg.

C'est le Gouvernement fédéral qui procure près de 90 % des recettes du budget de DESY. La ville de Hambourg assure le complément à 100 pour DESY-Hambourg, alors que ce complément est fourni par le Land de Brandebourg pour DESY-Zeuthen.

Au plan des effectifs, DESY rassemble environ 3400 scientifiques provenant de 35 pays. Les personnels permanents représentent 1046 personnes à DESY-Hambourg et 126 personnes à DESY-Zeuthen.

La physique des particules compte 1230 chercheurs provenant de 112 instituts différents répartis dans 25 pays. Le rayonnement synchrotron concerne quant à lui 2140 chercheurs provenant de 230 instituts différents situés dans 33 pays différents, les chercheurs étrangers représentant 33 % du total de ce domaine.

1.2. Un ensemble exceptionnel d'accélérateurs et de synchrotrons en synergie les uns avec les autres

DESY-Hambourg présente, à quelques kilomètres du centre ville, une accumulation exceptionnelle de très grands instruments scientifiques, accumulation qui témoigne d'une continuité remarquable dans les efforts de recherche, tant pour la physique des particules que pour le rayonnement synchrotron (voir tableau suivant). La politique scientifique suivie à DESY a été celle d'un développement graduel et cumulatif.

Tableau 19 : Les installations de DESY (Deutsche Elektronen-Synchrotron)

1. Pré-accélérateurs						
nom de l'installation	type de particules			énergie maximale du faisceau	longueur ou circonférence	caractéristiques et remarques
	e ⁻	e ⁺	H ⁺			
LINAC II	x	x		450 MeV	70 m	Accélérateur linéaire – injecteur pour DESY II
LINAC III			x	50 MeV	32 m	Accélérateur linéaire –

						injecteur pour DESY II
PIA	x	x		450 MeV	29 m	Accumulateur – pour DESY II
DESY II	x	x		8 GeV	293 m	Synchrotron – injecteur pour DORIS et pour PETRA
DESY III			x	7,5 GeV	317 m	Synchrotron
PETRA II	x	x	x	12 GeV 40 GeV	2,3 km	Accélérateur circulaire

2. Anneau de stockage utilisé en physique des particules

type d'installation	type de particules		énergie maximale du faisceau	longueur ou circonférence	caractéristiques et remarques
HERA	x	x	30 GeV	6,3 km	4 zones d'interaction en polarisation longitudinale

3. Sources de rayonnement synchrotron

type d'installation	type de particules		énergie maximale du faisceau	longueur ou circonférence	caractéristiques et remarques
DORIS III	x	x	4,5 GeV	289 m	11 lignes de faisceaux

						<p>d'aimants de courbure 2 eV – 200 keV</p> <p>10 lignes de faisceaux sur wigglers ou onduleurs</p> <p>20 eV – 200 keV</p>
PETRA II	x	x		12 GeV	2,3 km	<p>1 ligne de faisceau d'ondeur</p> <p>15 keV - 500 keV</p>

4. Laser à électrons libres – en construction

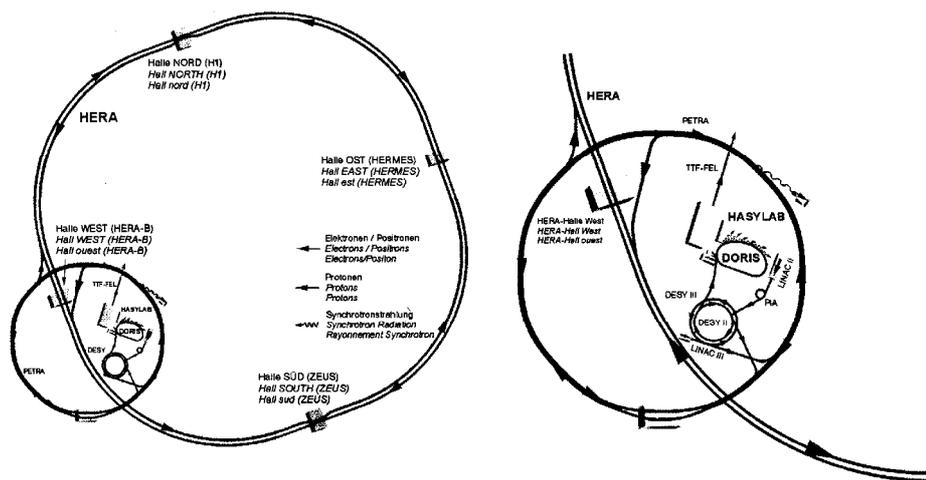
type d'installation	type de particules		énergie maximale du faisceau	longueur ou circonférence	caractéristiques et remarques
TTF-FEL	x	x		300 m	<p>Accélérateur linéaire supraconducteur pour le domaine spectral UV dans le vide (6 nm) – fonctionnement basé sur le principe SASE ; utilisation pour les sciences naturelles dès 2003</p>

Une particularité de ces installations est qu'elles sont en synergie totale.

Un accélérateur linéaire de protons comme le LINAC III sert en effet d'injecteur à la fois pour l'anneau de stockage DESY II et pour l'anneau PETRA.

De même, le synchrotron DESY II sert d'injecteur d'électrons ou de positrons aussi bien pour l'anneau DORIS utilisé pour la production de rayonnement synchrotron que pour l'anneau PETRA dont la finalité est principalement la physique des particules. Quant à ce dernier, il est utilisé non seulement pour la physique des particules et la production de rayonnement synchrotron mais aussi comme injecteur pour l'anneau HERA de 6,3 km de circonférence.

Figure 2 : Schéma des accélérateurs et des anneaux de stockage de DESY



En définitive, les installations de DESY permettent des investigations sur la structure de la matière, depuis les cristaux jusqu'aux électrons et aux quarks (voir tableau suivant).

Tableau 20 : Domaines d'études de DESY

objet	dimension	domaine d'étude	instrument d'étude au HASYLAB
cristal	10^{-2} m	rayonnement synchrotron	DORIS III, PETRA II
molécule	10^{-9} m (1	rayonnement	DORIS III,

	nm)	synchrotron	PETRA II
atome	10^{-10} m (1 Å)	rayonnement synchrotron	DORIS III, PETRA II
noyau atomique	10^{-14} m		
proton	10^{-15} m	physique des particules	HERA
électron, quark	10^{-18} m	physique des particules	HERA

1.3. un centre de formation par la recherche

Une autre caractéristique remarquable de DESY est de contribuer d'une manière sans doute décisive à la formation de nombreux étudiants chercheurs. De fait, la décision de lier étroitement les très grands instruments aux universités a été prise à la fin des années 1950 en Allemagne.

En 1999, ce sont 291 étudiants préparant leur mémoire de maîtrise, 237 étudiants en doctorat, 602 " *post doc* " et 74 étudiants en formation permanente, qui ont conduit leurs recherches à DESY, soit au total 1130 étudiants, dont 37,2 % en provenance d'universités non allemandes.

En conséquence, nombreuses sont les universités qui sont en charge d'une ligne de lumière ou d'un instrument à DESY ou HASYLAB.

Pour la direction de DESY, la présence de nombreux étudiants, au demeurant fort peu intimidés par ces installations à la fois gigantesques et complexes, ajoute au dynamisme des chercheurs de DESY.

La formation dans un tel centre de haut niveau élève sans aucun doute le niveau de compétence mais aussi le niveau d'exigence technique des futurs cadres de l'industrie. En tout état de cause, selon le Professeur Dr . Jochen SCHNEIDER, " *les étudiants reçoivent une formation vraie, au contact des machines d'une grande sophistication et d'une grande ambition* ". Au total, sur l'exemple du HASYLAB, " *la présence d'un synchrotron dans une région est bien de nature à entraîner des changements importants dans l'enseignement et la recherche de toute une région* ".

2. Le projet TESLA et les perspectives de coopération franco-allemande en physique des particules

DESY, comme tous les laboratoires de physique des particules, s'efforce de répondre à trois types de questions. La première concerne la mise en évidence de tous les constituants de la matière. La deuxième porte sur la caractérisation des différentes forces existant dans l'univers. La troisième porte sur le point de savoir s'il existe une force unique dont toutes les autres dériveraient et s'il existe des composants ultimes de la matière à la base de tous les autres. Ces questions fondamentales sont évidemment liées à la cosmologie et à l'existence d'un événement fondateur de l'univers, à savoir le " *Big Bang* ".

Tout en disposant pour quelques années encore d'un anneau de grande taille avec HERA, DESY étudie à l'heure actuelle le projet TESLA, qui, toujours dans le cadre d'une coopération internationale, lui permettra de franchir une nouvelle étape.

2.1. Les expériences conduites avec l'anneau HERA

L'instrument principal utilisé à DESY pour la physique des particules est, comme on l'a vu l'anneau HERA, d'une énergie de 30 GeV pour les électrons et les positons, et de 820 GeV pour les protons, et dont la circonférence est de 6,3 km. L'anneau comporte quatre zones d'interaction, où sont examinées principalement les conséquences de chocs entre électrons et protons, entre électrons et positons, et entre protons opposés à d'autres protons.

La construction de l'anneau HERA s'est effectuée au plan international, dans le cadre de coopération avec 13 pays, la France ayant joué un rôle important. HERA a des dimensions modestes par rapport au LEP du CERN.

Mais, utilisant des aimants supraconducteurs pour l'accélération des protons et des aimants classiques pour celle des électrons, il s'agit là d'un des plus grands " *microscopes* " du monde, permettant d'étudier la structure des protons (10^{-15} m) voire celle des électrons (10^{-18} m).

2.2. Le projet TESLA

Le projet TESLA (Teraelectronvolt Energy Superconducting Linear Accelerator) a pour objectif la construction d'un accélérateur linéaire d'une longueur totale de 33 km. Des deux extrémités de cet équipement, partiront en sens inverse des électrons et des positons, destinés à entrer en collision au point milieu, où se trouveront un ensemble de détecteurs. Au point milieu de TESLA, se trouveront aussi des lignes permettant la dérivation des électrons vers les lasers à rayons X.

Selon toute probabilité, il n'existera dans le monde qu'un seul collisionneur linéaire de ce type. DESY, fort de son expérience et d'une réflexion poussée sur ce projet, entend proposer à la communauté internationale sa construction à Hambourg.

2.2.1. La procédure et le calendrier

La première étape de la procédure prévue pour le lancement du projet TESLA est aujourd'hui entamée. En effet, la préparation du rapport de conception technique et d'estimation des coûts a été lancée au début février 2000, avec une publication prévue pour le début 2001. Il sera alors soumis au Conseil scientifique fédéral nommé par le Président de la République. Le dossier complet, assorti de l'avis du Conseil scientifique fédéral, sera alors transmis pour décision au Gouvernement fédéral ainsi qu'aux autorités de la ville de Hambourg et du Land de Brandebourg.

Selon le Professeur Dr. Albrecht WAGNER, président du conseil de direction de DESY, le Gouvernement fédéral est très intéressé par la construction d'un nouveau très grand instrument en Allemagne et devrait, selon toute vraisemblance, donner un verdict positif, si deux conditions toutefois sont remplies : d'une part un avis favorable du Conseil scientifique fédéral, et d'autre part, la mise au point d'une réelle coopération internationale. La décision devrait intervenir en tout état de cause au début de 2003. La construction de l'accélérateur linéaire TESLA devrait durer de 7 à 8 ans, pour un coût certainement supérieur à celui de HERA, qui s'est élevé à 1,3 milliard de DM, soit 4,4 milliards de francs environ. En définitive, l'horizon du projet TESLA est de 10 à 15 ans.

2.2.2. Les critères d'évaluation de la recherche en Allemagne

Les trois plus grands organismes de recherche allemands ont fait l'objet récemment d'une évaluation internationale délivrée par un panel international de scientifiques de haut niveau.

Ces critères sont présentés au tableau suivant.

Tableau 21 : Les 5 conditions d'une bonne recherche

Pour être considérée comme de qualité, la recherche doit :	1. Explorer un nouveau champ de connaissances
	2. Se concentrer sur les domaines ayant un grand potentiel d'avenir
	3. Soutenir l'interdisciplinarité
	4. Renforcer l'éducation des étudiants et des jeunes chercheurs
	5. Renforcer la coopération internationale

Pour M. Jean GALLOT, ces cinq critères fournissent une grille d'évaluation particulièrement pertinente. Chacun des 5 éléments doit être pris en compte, et tout particulièrement la nécessité de se concentrer sur des domaines ayant un grand potentiel. En tout état de cause, la prise en compte de l'avenir a une traduction budgétaire à DESY, puisque 17 % du budget sont consacrés à des dépenses de développement. Par ailleurs, si cette grille d'analyse s'applique au présent, elle entraîne aussi la nécessité de mettre en place une planification glissante sur 10 ans.

En tout état de cause, selon le Pr. Dr. Albrecht WAGNER, "*pour jouer les premiers rôles dans la recherche mondiale, il faut être en avance*". Le projet TESLA le permettra sans aucun doute.

Au reste, "*il faut des instruments pour réaliser des idées et exploiter des résultats*". Il faut également "*préparer le terrain*", et les très grands instruments sont indispensables à cet égard. "*Des pays comme la France et l'Allemagne ne peuvent compter sur leurs ressources naturelles pour leur développement et doivent au contraire faire de leur créativité le moteur de leur développement*".

2.2.3. La coopération internationale

La coopération entre la France et DESY existe d'ores et déjà dans le domaine de la physique des particules. Compte tenu des investissements à réaliser et des compétences technologiques à rassembler, la demande du Gouvernement fédéral de réaliser TESLA dans le cadre d'une coopération internationale est bien légitime, selon le

Professeur Dr. Jochen SCHNEIDER, en raison de son ambition et de son ampleur.

Cette coopération avec la France s'effectue par l'entremise du CEA et du CNRS, qui ont, notamment, fourni, depuis 1965, différents équipements, tant pour HERA que pour l'installation TTF-FEL, démonstrateur du futur laser à électrons libres. En 1997, 112 chercheurs français appartenant à 8 universités ou organismes de recherche étaient impliqués à DESY.

Pour les responsables de DESY, le schéma idéal pour l'intégration de laboratoires de différents pays dans un grand projet international est que les chercheurs partagent leur activité entre le site de l'instrument international et leur laboratoire national d'origine. Ce modèle est mis en œuvre à DESY avec succès.

3. Le rayonnement synchrotron au Hasylab : recherche, service et éducation

Les activités relatives au rayonnement synchrotron tant en ce qui concerne la recherche sur le rayonnement synchrotron que la mise en œuvre de ce dernier, sont à DESY du ressort de la direction dite du HASYLAB (Hamburg Synchrotron Laboratory).

Une autre entité administrative s'ajoute à ce dernier : il s'agit de l'antenne permanente de l'EMBL (European Molecular Biology Laboratory) sur le site de DESY. En outre l'unité de développement des lasers à électrons libres se trouve sous la double autorité du responsable des accélérateurs et de celui du HASYLAB.

Le rayonnement synchrotron est produit à DESY par deux anneaux, DORIS III, dont l'énergie maximale atteint 4,5 GeV, et PETRA II, dont l'énergie maximale atteint 12 GeV.

Au total, les deux sources de rayonnement synchrotron DORIS III et PETRA II offrent 44 stations expérimentales indépendantes dotées de 79 instruments utilisés alternativement.

DORIS III possède en particulier 7 " *wigglers* " dont les performances, certes inférieures à celles d'un onduleur en terme d'émittance, sont toutefois très intéressantes, avec une intensité de l'ordre de 80 % de celle atteinte à l'ESRF, pour des échantillons d'une taille relativement grande.

C'est l'anneau de stockage DORIS III, dont la forme est celle d'une piste olympique, avec ses 11 lignes de lumière sur aimants de courbure et ses 10 lignes sur onduleurs et " *wigglers* " qui fournit la contribution la plus importante. L'anneau circulaire PETRA II ne possède quant à lui qu'une ligne de lumière sur onduleur qui est utilisée d'une façon accessoire pour la recherche avec le rayonnement synchrotron, quand la machine n'est pas utilisée pour l'injection de protons ou d'électrons dans l'anneau HERA.

La durée de fonctionnement de DORIS III atteint environ 5000 heures par an.

Le budget annuel de l'anneau DORIS III était en 1998 de 9 millions de DM, soit 30,2 millions de francs et le budget du Hasylab de 27 millions de DM, soit de 90,6 millions de francs.

3.1. Un laboratoire de services

On retrouve à DESY la particularité remarquable des synchrotrons d'attirer autour d'eux un nombre de chercheurs largement supérieur aux autres très grands instruments.

Alors que la physique des particules rassemble 1230 scientifiques provenant de 25 pays autour de l'anneau HERA, les anneaux DORIS III et PETRA II dont la mission est la production de rayonnement synchrotron rassemblent, quant à eux, 2140 scientifiques, dont 33 % provenant de pays étrangers.

On notera au passage que ces statistiques sont établies sur la base de la convention selon laquelle un même chercheur venant à plusieurs reprises à DESY n'est compté qu'une seule fois, comme au MaxLab de l'université de Lund et au contraire de la pratique de l'ESRF.

Au reste, DESY abrite un laboratoire de 50 personnes de l'EMBL (European Molecular Biology Laboratory) qui sert à une communauté d'utilisateurs d'environ 500 chercheurs dans le domaine de la biologie structurale dont la plupart s'intéressent à la cristallographie des protéines.

Il faut noter que le mode de fonctionnement du HASYLAB est plutôt coopératif que commercial, en ce sens que contrairement à ce que l'on observe à Daresbury ou au Rutherford Appleton Laboratory, les chercheurs, à l'intérieur d'une contribution financière globale, procèdent volontiers à des échanges de temps de faisceau sans facturation.

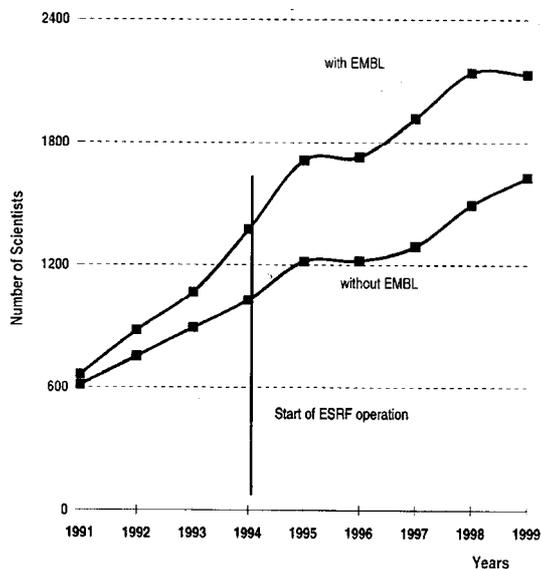
3.2. Une activité en croissance rapide, notamment du fait d'une forte utilisation par les biologistes

Le HASYLAB est, comme DESY en général, un laboratoire de recherche fondamentale, en l'occurrence sur le synchrotron, et un laboratoire jouant un rôle important dans l'enseignement supérieur allemand. Mais c'est aussi un laboratoire de service, pour la communauté scientifique nationale et internationale, dans l'ensemble des domaines de la physique, de la chimie et de la biologie.

3.2.1. Un nombre d'utilisateurs en forte croissance

En 1991, les installations du HASYLAB étaient utilisées à des fins expérimentales par environ 600 chercheurs. Aujourd'hui, le total atteint environ 2100 personnes. L'implantation d'un laboratoire de l'EMBL a bien entendu contribué à cet essor. En l'occurrence, en 1999, près de 500 chercheurs de l'EMBL ont utilisé les faisceaux de DORIS III et de PETRA II.

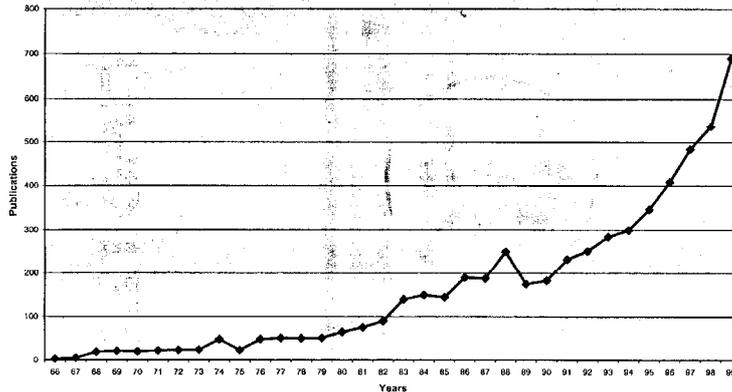
Figure 3 : Evolution du nombre de chercheurs réalisant des expériences au HASYLAB



Pour les responsables du HASYLAB, l'accès à un synchrotron est un moyen idéal pour " *emmener des petites équipes de scientifiques dans une recherche de très haute compétitivité* ".

De fait, le nombre de publications réalisées grâce à des expérimentations au HASYLAB, a connu un essor remarquable (voire figure suivante).

Figure 4 : Nombre de publications citées dans le rapport annuel du HASYLAB



3.2.2. L'envolée de la biologie au HASYLAB

Le HASYLAB dispose de 7 lignes de lumière allouées à la biologie. Parmi celles-ci, 4 sont équipées pour la biologie structurale et 3 pour l'absorption-diffusion des systèmes non cristallisés.

D'une manière générale, un faisceau provenant d'un "wiggler" donne lieu à DESY à deux expériences. Les lignes de cristallographie sont équipées d'instruments similaires, de façon à être substituables et à faciliter une exploitation 24h sur 24.

L'impact du HASYLAB sur les publications scientifiques de biologie structurale, avec 357 publications signalées en 1999, est du même ordre de grandeur que celui de l'ESRF (voir tableau suivant).

Figure 5 : Statistiques d'impact des principaux synchrotrons mondiaux sur les publications de biologie structurale,

source : HASYLAB-DESY Hambourg

Nombre de " alert papers "	1994	1995	1996	1997	1998	1999

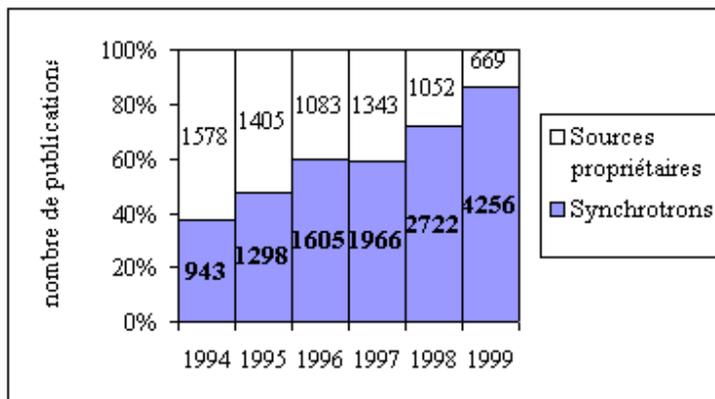
dans Structure						
I – SYNCHROTRONS						
Europe						
Daresbury (SRS)	247	255	163	237	323	286
Grenoble (ESRF)		64	130	193	365	382
Hambourg (Hasylab)	116	144	205	250	272	357
Lund (MaxLab)					28	
Lure	65	112	100	16	113	117
Trieste (ELETTRA)					28	73
Europe – total	428	575	598	696	1 129	1 215
Amérique du Nord						
Argonne						273
Berkeley						306
Brookhaven	149	299	476	571	638	919
Chess	148	121	259	316	585	852
Stanford	58	187	199	306	322	609
Amérique du Nord (total)	355	607	934	1 193	1 545	2 959
Japon						
Tsukuba	160	116	73	77	48	82
II – SOURCES PROPRIETAIRES (de laboratoire)						
Monde	1 578	1 405	1 083	1 343	1 052	669
TOTAL						
Monde	2 521	2 703	2 688	3 309	3 774	4 925

Le tableau précédent démontre également, dans les limites de la méthode statistique utilisée, que le recours aux synchrotrons pour l'élucidation des structures est en tout état de cause fortement croissant (voir figure suivante).

Figure 6 : Comparaison du total mondial de publications de biologie structurale résultant des travaux conduits sur des synchrotrons

ou sur des sources propriétaires

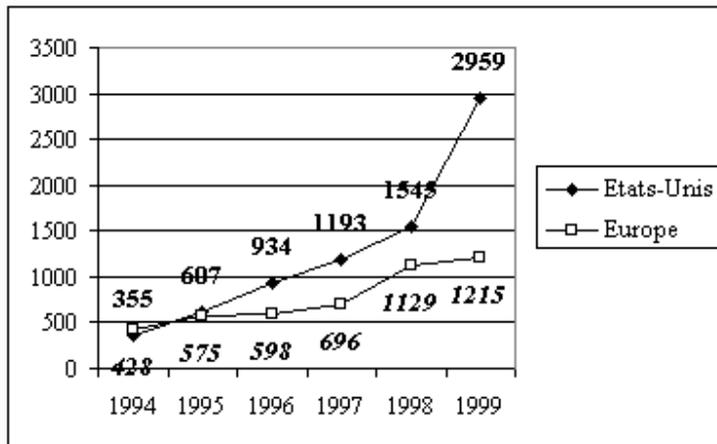
source HASYLAB - DESY Hambourg



Ainsi le HASYLAB participe avec efficacité à la course actuelle à la résolution des structures. Mais, au total, l'Europe manifeste un retard très important sur les Etats-Unis, comme le montre le graphique suivant.

Figure 7 : Nombre de publications en biologie structurale résultant de travaux conduits sur les synchrotrons américains ou européens

source : HASYLAB –DESY Hambourg



Selon le Professeur Dr. Jochen SCHNEIDER, la forte accélération du rythme des résolutions de structure de protéines aux Etats-Unis grâce à l'utilisation du rayonnement synchrotron, est une conséquence, parmi d'autres, de l'augmentation spectaculaire des crédits du NIH (National Institute of Health).

3.2.3. Les développements prévus et leurs coûts

Selon le Pr. Dr. Jochen SCHNEIDER, l'automatisation de l'installation des échantillons sur les goniomètres des lignes de lumière pour la cristallographie des protéines est encore loin de pouvoir devenir opérationnelle.

Les projets de l'ESRF en la matière lui paraissent très importants. Au demeurant, une automatisation complète ne semble pas entrer dans la vocation du HASYLAB, où la formation supérieure et le contact entre les chercheurs visiteurs et les chercheurs résidents jouent un grand rôle.

S'agissant des autres types de progrès à effectuer, le HASYLAB met l'accent sur le fait que tous les maillons de la chaîne

source → échantillon → détecteur

sont concernés.

Parmi les instruments les plus onéreux sur une ligne de lumière, figurent l'optique et notamment les monochromateurs et, en aval de l'échantillon, les détecteurs. On trouve au HASYLAB des détecteurs de type "image plate" et des détecteurs à caméra CDD qui permettent d'obtenir plus rapidement les mesures, grâce à une excitation préalable

des atomes récepteurs. En aval de la mesure, le laboratoire de rayonnement synchrotron doit aussi mettre à disposition des chercheurs des équipements informatiques de haute performance, notamment pour procéder à des vérifications de la qualité des données recueillies, avant le retour dans le laboratoire d'origine.

Au reste, ce sont bien les frais de personnel qui représentent la principale dépense. Des personnels très qualifiés sont en premier lieu nécessaires pour l'adaptation de l'instrumentation achetée sur le marché aux besoins spécifiques de l'installation. Il faut également aux chercheurs visiteurs une assistance donnée par des personnels de haute qualification.

De surcroît, les chercheurs visiteurs attendent de trouver sur place, non seulement une assistance technique pour l'accès à la machine, mais également des chercheurs résidents conduisant leurs propres recherches de haut niveau, afin d'avoir des échanges fructueux avec eux. Les responsables du HASYLAB sont convaincus qu'il s'agit là d'une exigence fondamentale de la part des chercheurs visiteurs. Certes la qualité des faisceaux est importante. Mais l'enrichissement au contact de scientifiques résidents est un critère de choix essentiel.

Au total, il paraît impossible, dans le chiffrage du coût d'accès à des lignes de lumière situées sur un synchrotron étranger, de ne pas tenir compte des coûts correspondant à la création et à l'exploitation d'un laboratoire national situé dans l'environnement même de la machine.

En conséquence, aux coûts des lignes de lumière et de leur instrumentation, il est indispensable non seulement d'ajouter les coûts des personnels d'exploitation et d'assistance technique, mais également les coûts des infrastructures, des équipements et des coûts salariaux correspondant à un ou plusieurs laboratoires permanents installés sur le site.

3.3. Un centre aujourd'hui saturé ne comportant pas de lignes libres

Les autorités françaises se sont enquis, à plusieurs reprises depuis 1998, de la disponibilité de lignes en Allemagne, dans le cadre de la recherche de lignes complémentaires à celles négociées sur DIAMOND.

DESY n'offrait et n'offre aujourd'hui aucune possibilité.

En revanche des ressources disponibles existaient encore au début 1998 sur l'anneau de stockage BESSY II.

Trois visites ont été en conséquence réalisées par des responsables français, l'une rapide et non technique par M. Paul CLAVIN, la deuxième par Mme GODET et M. Yves FARGE et la dernière par des membres de l'équipe de M. PELLAT.

Faute de concrétiser un accord, la ligne d'onduleur qui était disponible en 1998, ne l'est plus aujourd'hui. Début 2000, quelques faisceaux sur aimant de courbure sont seuls disponibles, ainsi qu'une ligne sur un "*wavelength shifter*", dispositif produisant des rayons X avec une divergence énorme.

Cette saturation rapide des machines allemandes en quelques mois illustre bien, si cela était encore nécessaire, la montée générale des besoins en temps de faisceau.

Au vrai, l'on aurait pu espérer que la meilleure maîtrise des manipulations sur les lignes de lumière, acquise grâce à l'expérience accumulée, eût repoussé la saturation effective des machines. En fait, il n'en est rien. Le mouvement naturel des chercheurs est en effet d'aller toujours aux meilleures possibilités de la machine, et donc de s'ingénier à affiner leurs résultats, de sorte que les temps de séjour ne sont pas réduits sensiblement.

Selon la direction de DESY, une autre dimension importante des synchrotrons est leur longévité, qui exige que l'on ne sous-dimensionne pas une installation, puisqu'elle est destinée à durer au moins 20 ans.

3.4. Les caractéristiques idéales d'un synchrotron moderne

Pour le Professeur Dr. Jochen SCHNEIDER, un synchrotron moderne de caractéristiques idéales doit être le point de rencontre des exigences de coûts, qui tendent à faire adopter une énergie moyenne, et des exigences techniques, qui visent à permettre d'utiliser les dispositifs d'insertion modernes que sont les onduleurs à très faible entrefer.

Sur un plan technique, il est en conséquence fondamental, d'une part de concevoir des faisceaux ayant la plus faible émittance possible et d'autre part de bénéficier de faisceaux stables, c'est-à-dire de faisceaux d'électrons d'au moins une quinzaine d'heures de durée de vie.

Au reste, un synchrotron représentant un investissement lourd et opérationnel sur au moins 20 ans, il est indispensable d'opter pour les meilleures technologies du moment et de ne pas faire des économies de départ qui pourraient par la suite s'avérer désastreuses.

Par ailleurs, si une coopération internationale est recherchée pour la construction du synchrotron, ce que de nombreux pays n'ont pas choisi de faire, il est essentiel de commencer la coopération au niveau des scientifiques, puis de l'acter au niveau politique et non pas l'inverse, tant il est vrai qu'une coopération réelle et efficace ne se décrète pas du sommet.

Par ailleurs, l'expérience américaine récente montre qu'il y a un très grand risque que les crédits annulés du fait de l'abandon d'un très grand instrument scientifique, soient absorbés par le budget général et ne soient pas laissés à disposition du budget de la recherche.

En tout état de cause, comme l'indique M. Jean GALLOT, l'absence d'un synchrotron national de 3^{ème} génération sur le sol français non seulement serait dommageable pour les utilisateurs dans leur activité courante, mais compromettrait à terme le potentiel de la recherche française, tant au niveau de sa capacité à mettre en œuvre le rayonnement synchrotron qu'à celui de la recherche dans ce domaine, et, au final, handicaperait gravement son potentiel de coopération internationale.

4. Les lasers à électrons libres, futurs compléments des synchrotrons de 3^{ème} génération

La recherche sur les lasers à électrons libres s'inscrit à DESY en cohérence avec le projet TESLA de construction d'un collisionneur linéaire pour la physique des particules.

Le plan d'action de DESY à cet égard, indiqué au tableau suivant, vise la mise au point en 2010 d'un laser à électrons libres dans le domaine des rayons X.

Tableau 22 : Plan d'action de DESY dans le domaine des lasers à électrons libres

date	objectif de longueur d'onde	lieu et remarque
2000	1200 Å (120 nm)	Installation test de TESLA à DESY
2003	60 Å ÷ 20 Å (6nm ÷ 2 nm)	Laser à électrons libres V-UV à DESY
2005	1,5 Å (0,15 nm)	Laser à électrons

		libres LCLS à Stanford
2010	1 Å (0,1 nm)	Laser à électrons libres à rayons X à TESLA à DESY

En tout état de cause, la recherche sur les lasers à électrons libres s'inscrit dans la ligne des développements continus conduits à DESY.

Selon toute vraisemblance, les expériences sur l'installation HERA (30 GeV – 6,3 km) s'arrêteront en 2005, du fait de la mise en service du LHC (Large Hadron Collider) du CERN. Il y aura alors 5 à 10 faisceaux à récupérer, qui seront affectés au laser à électrons libres.

Plusieurs éléments marquants caractérisent cet ambitieux programme. Le premier est le choix de la technologie SASE (Self Amplified Spontaneous Emission). Le deuxième, d'une grande importance, est la réalisation, le 23 février 2000, d'une expérience prouvant la validité de la méthode retenue. Le troisième élément est la perspective d'application des lasers à électrons libres à l'analyse destructive de la matière non cristallisée, en particulier aux protéines non cristallisables, dont le nombre est, comme on sait, très important.

4.1. Le principe de la technologie SASE

Le principe des lasers à électrons libres est de faire produire par des paquets d'électrons de forte densité un rayonnement de la plus faible longueur d'onde et de la plus forte brillance possibles.

Sur un plan technologique, après les tubes à rayons X, sont apparus les synchrotrons de 2^{ème} génération produisant un rayonnement à partir des aimants de courbures. Puis les " *wigglers* " et les onduleurs ont été mis au point permettant d'atteindre, sur les synchrotrons de 3^{ème} génération, des brillances supérieures d'un facteur dix milliards de fois supérieur aux premiers faisceaux de synchrotrons de 2^{ème} génération.

L'objectif avec les lasers à électrons libres est de gagner un facteur 1 000 000 par rapport aux meilleurs onduleurs de l'ESRF, par exemple. Ainsi, serait respectée la loi selon laquelle " *le rayonnement synchrotron gagne en brillance trois ordres de grandeur tous les dix ans* " (voir figure ci-après).

Figure 8 : Evolution de la brillance des faisceaux selon les techniques utilisées

—
—
—
—
—
—
—

Le principe des lasers à électrons libres est de faire évoluer un faisceau d'électrons de sorte qu'un effet d'auto-amplification du rayonnement électromagnétique émis par les électrons se déclenche spontanément.

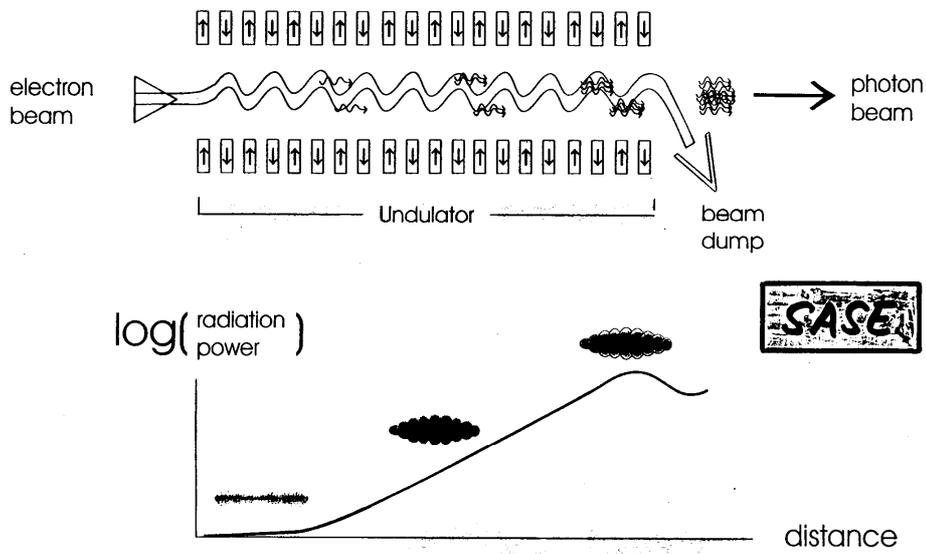
Deux technologies sont envisageables à cet égard, la première défrichée en France au Lure et la deuxième au HASYLAB.

La première voie consiste à initier une modulation de charge des paquets d'électrons par un champ électromagnétique intense, quand le paquet traverse un onduleur de quelques dizaines de mètres de longueur.

De fait les paquets d'électrons utilisés dans les anneaux de stockage sont peu denses et la modulation de charge est possible en utilisant un résonateur optique avec des miroirs. En toute hypothèse, lorsque l'on implante un laser à électrons libres sur un anneau de stockage, il semble qu'on soit limité à des longueurs d'onde de l'ordre de 150 nm. La difficulté est de fabriquer des miroirs à rayons X, de sorte que ce principe rencontre un obstacle qui semble insurmontable aux responsables du HASYLAB.

L'autre voie, retenue au HASYLAB consiste à placer le faisceau dans un onduleur de grande longueur. Dans ce cas, l'on cherche à obtenir des paquets d'électrons d'une grande densité. Il suffit alors d'appliquer un champ magnétique relativement peu élevé pour déclencher l'effet SASE(voir figure suivante).

Figure 9 : Schéma de principe de l'effet SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) dans un laser à électrons libres



Free Electron Laser in the Self Amplified Spontaneous Emission (SASE) mode
J. Rossbach

De fait, le but du programme de recherche sur les lasers à électrons libres au HASYLAB est de parvenir à structurer la charge d'un paquet d'électrons pour produire des modulations en intensité.

L'intensité du faisceau dépendra ainsi non seulement du carré du nombre de dipôles mais également du carré du nombre d'électrons (voir figure suivante).

Figure 10 : Intensités des faisceaux issus de différents dispositifs d'insertion



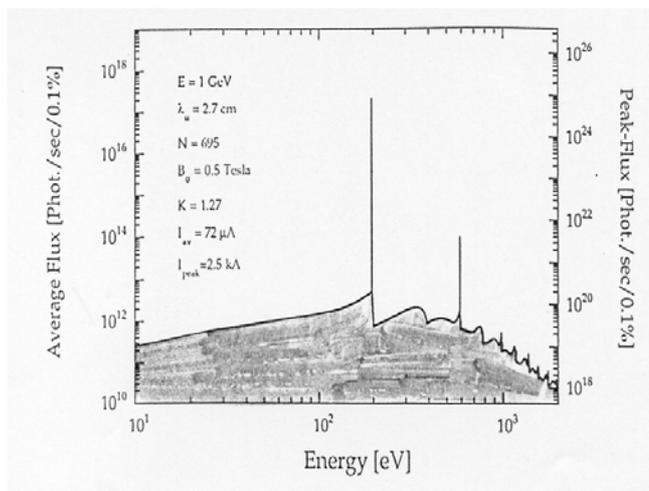
La théorie démontre que dans le cas d'un laser à électrons libres, l'intensité du faisceau dépend du nombre d'électrons au carré. Les perspectives de gain en brillance sont donc considérables.

4.2. Le succès du 23 février 2000

Dans le domaine de lasers à électrons libres, toute la difficulté est d'une part de produire le phénomène d'amplification de l'émission d'ondes électromagnétiques et d'autre part d'obtenir cet effet pour les longueurs d'onde les plus faibles possibles.

L'expérience réussie le 23 février 2000 sur l'installation TTF-FEL du HASYLAB a permis de mettre en évidence l'effet d'amplification recherché, pour une longueur d'onde de 109 nm (1090 Å). Les expérimentateurs de TTF-FEL ont constaté en effet, ce jour là pour la première fois, un gain en brillance d'un facteur 200, avec une contraction d'un facteur 10 de la distribution de longueur d'onde (voir figure suivante).

Figure 11 : Mise en évidence de l'effet SASE sur l'installation TTF-FEL du HASYLAB



Dans ce type d'application, les caractéristiques du faisceau d'électrons sont de la plus haute importance pour les applications qui peuvent en être tirées.

De fait, il s'agit de trains de paquets d'électrons, chaque train étant séparé du suivant par environ 100 ms. Le nombre de paquets dans un même train peut varier entre 1 et 7200. La largeur de chaque paquet est de 400 femtosecondes, selon la figure suivante.

Figure 12 : Schéma des trains de paquets d'électrons sur l'installation TTF FEL (démonstrateur de laser à électrons libres) du HASYLAB

Au total, le rayonnement obtenu possède trois caractéristiques intéressantes : d'une part, il s'agit d'un rayonnement pulsé, d'autre part sa brillance est très forte et enfin, il s'agit d'un rayonnement cohérent.

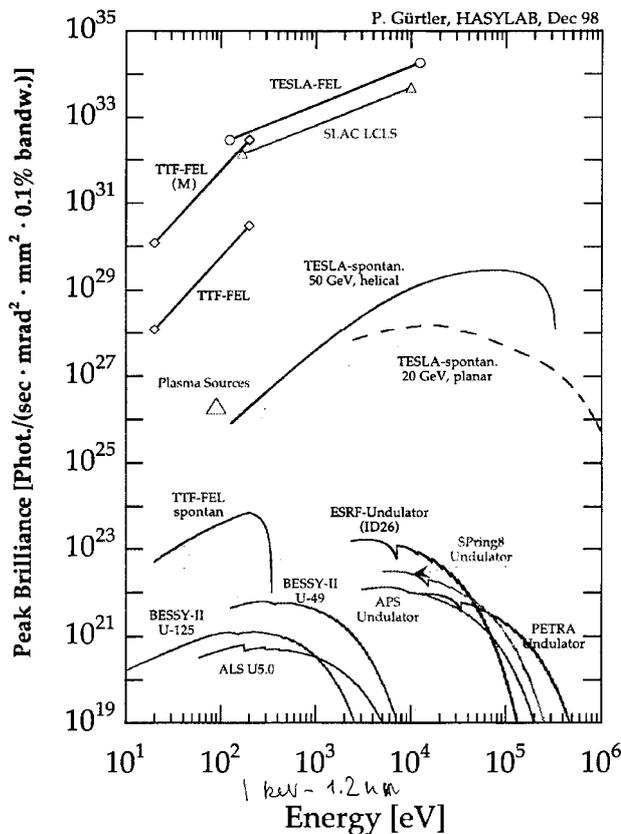
Certes pour l'instant, la longueur d'onde du rayonnement obtenu est de 109 nm. De nombreux progrès sont donc nécessaires pour parvenir aux longueurs correspondant aux rayons X. Toutefois, la démonstration est faite de l'existence de l'effet SASE sur des onduleurs de grandes dimensions. Les recherches vont donc pouvoir se poursuivre avec ardeur.

Il est à noter, à cet égard, que les chercheurs français de Saclay et d'Orsay ont joué un rôle important dans la mise au point du démonstrateur que constitue l'installation TTF-FEL, notamment par leur maîtrise des technologies des aimants supraconducteurs.

4.3. Les perspectives d'application des lasers à électrons libres à rayons X, en complément au rayonnement synchrotron

Les lasers à électrons libres ne sont en aucun cas destinés à se substituer au rayonnement synchrotron, et ceci pour plusieurs raisons. La première est qu'il s'agira vraisemblablement d'installations de grande ampleur et très onéreuses. La deuxième est que les faisceaux obtenus auront des brillances très élevées susceptibles de détruire les échantillons analysés (voir figure suivante).

Figure 13 : Les lasers à électrons libres complémentaires des synchrotrons de 3^{ème} génération



Au demeurant, il s'agit là d'un inconvénient en terme de durée de vie. Mais les très hautes brillances ne sauraient être tenues pour inutiles, bien au contraire.

Pourquoi, en effet, est-il nécessaire de disposer de cristaux pour obtenir des images des structures des macromolécules par la méthode de la diffraction ? En réalité, c'est pour que se créent dans le cristal des interférences renforçant ce phénomène, les faisceaux de lumière étant au demeurant peu cohérents.

Cette condition constitue actuellement une limite aux applications du rayonnement synchrotron. En effet, la cristallisation se révèle difficile pour de nombreuses protéines, en particulier pour les protéines membranaires.

Si la matière n'est pas cristallisée, ce phénomène d'interférences cumulatives ne se produit pas. Mais, " *peut-être, avec un faisceau d'une brillance encore plus forte que ce dont on dispose actuellement, sera-t-il possible d'obtenir une image* " ? D'où l'idée d'obtenir la structure de

macromolécules non cristallisées avec un faisceau de lumière cohérente doté d'une brillance très forte.

Certes, si la brillance est très forte, l'exposition au faisceau conduira sans doute à la destruction du matériau étudié.

Mais l'objectif sera alors d'étudier les interactions entre les photons et la molécule, la déformation par réarrangement de la molécule sous le coup des photons jusqu'à son éclatement, et d'en tirer, par le calcul, des informations sur la structure de la molécule initiale.

Un des points clés sera donc la récupération d'informations pendant ce laps de temps en vue de la réalisation de calculs complexes. Par ailleurs, les lasers à électrons libres devraient permettre des études de structure dynamiques ainsi que des études "*pump and probe*", dans lesquelles les molécules sont étudiées dans leur état normal et aussi après excitation par un laser.

Concernant la préparation des échantillons soumis à une telle analyse destructive, le HASYLAB prévoit la possibilité de préparer des agrégats d'atomes en très petit nombre, dont le processus de destruction sera atténué ou différent.

Une coopération étroite avec les spécialistes des lasers est logiquement prévue par le HASYLAB. Cette communauté a en effet l'expérience de la problématique de l'utilisation de faisceaux de lumière cohérente, sur des durées très courtes et avec une intensité très élevée.

Une nouvelle machine comme l'ESRF ouvre toujours de nouvelles applications. Mais "*cela n'a pas empêché le HASYLAB de continuer*". Selon toute probabilité, il en sera de même pour les lasers à électrons libres.

En tout état de cause, comment considérer que de nouveaux progrès sur le rayonnement synchrotron ne seraient pas possibles, au motif que les brillances atteintes sont d'ores et déjà supérieures d'un facteur 100 milliards à la brillance des tubes à rayons X ?

Pour le HASYLAB, les lasers à électrons libres ouvrent de nouvelles perspectives, certes différentes du rayonnement synchrotron tel qu'on l'utilise actuellement, mais des perspectives fondamentales si l'on veut que "*la science progresse dans les 10 ans*" dans ce domaine. Lorsque l'objectif sera atteint, les lasers à électrons libres devraient être opérationnels à des longueurs d'onde de l'ordre de l'angström (10^{-10} m)

et produire des faisceaux d'une brillance supérieure de 6 à 10 ordres de grandeur aux meilleurs faisceaux actuels.

Pour le Professeur Dr. Jochen SCHNEIDER, les lasers à électrons libres devraient constituer le domaine privilégié d'une coopération européenne dans le domaine du rayonnement électromagnétique.

Cette coopération se justifie par l'ampleur des moyens nécessaires et par l'importance des enjeux scientifiques. Le choix de ce domaine se justifierait davantage que celui des synchrotrons de 3^{ème} génération, dont les technologies sont suffisamment mûres et les coûts acceptables pour être mis en œuvre dans les cadres nationaux.

Conclusion : quel objectif pour la coopération internationale ?

La construction d'un synchrotron de 3^{ème} génération de haute énergie comme celle de l'ESRF, fut en son temps l'objet d'une coopération internationale. L'expérience a montré que c'était légitime.

Les caractéristiques de l'ESRF lorsqu'elles ont été décidées, excédaient en effet largement les capacités financières et technologiques d'un seul pays européen.

Aujourd'hui la construction d'un synchrotron de 3^{ème} génération fait appel à des technologies maîtrisées et à des investissements pour lesquels la dimension nationale est non seulement suffisante mais synonyme d'une plus grande efficacité.

Les installations internationales sont en effet lourdes à faire évoluer, en raison du rôle dévolu à des commissions multiples en matière de processus de décision, que ce soit pour des travaux sur les installations ou pour réglementer l'accès aux installations par la sélection des projets réalisés par des comités de programme.

Au contraire, selon le Professeur Dr. Albrecht WAGNER et le Professeur Dr. Jochen SCHNEIDER, le vrai niveau d'une coopération internationale est celui de la mise au point de nouveaux très grands instruments recourant à des technologies en émergence.

A cet égard, s'agissant des possibilités offertes par le HASYLAB, il faut noter que la France y est déjà active dans le domaine des accélérateurs linéaires de grande énergie et dans celui des lasers à électrons libres. Des coopérations existent d'ores et déjà entre la France et l'Allemagne, à la plus grande satisfaction des deux communautés scientifiques.

Se fondant sur le principe réaliste qu'une coopération ne se décrète pas mais se développe d'abord au niveau scientifique, avant d'être solennisée et amplifiée au niveau politique, les responsables de DESY sont demandeurs d'un accroissement des interactions avec la France tant pour les projets de laser à électrons libres que pour le projet de collisionneur linéaire TESLA.

Nul doute que le concours de la France est aujourd'hui recherché en raison des compétences de ses chercheurs. Il ne le serait plus si ces compétences disparaissaient, ce qui ne manquerait pas de se produire rapidement s'ils ne pouvaient disposer d'un nouveau synchrotron national d'une technologie avancée et polyvalent.