

SOLEIL, POINT D'ORGUE de l'AVENTURE du RAYONNEMENT SYNCHROTRON en France et en Europe

Abderrahmane Tadjeddine

Ancien Directeur du LURE, Ancien Directeur Scientifique Adjoint au CNRS chargé des
Grandes Infrastructures de Recherche pour la Chimie et Les Sciences du Vivant

Le 12 septembre 2001, le ministre de la recherche, Roger-Gérard Schwarzenberg annonçait la construction du nouveau synchrotron SOLEIL (*Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE, acronyme proposée dès 1990 par Dominique Chandesris*), à l'Orme les Merisiers, sur le plateau de Saclay, dans la continuité scientifique, technologique et géographique du LURE (*Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique*), centre national du rayonnement synchrotron, localisé dans le campus d'Orsay. Cette décision a été l'aboutissement d'une dizaine d'années d'efforts et de luttes déployés pour remplacer les installations vieillissantes du LURE, sauver de la dispersion les compétences scientifiques, techniques, instrumentales et humaines acquises et offrir à la communauté des utilisateurs un outil mutualisé exceptionnel de caractérisation, aussi bien dans le domaine des sciences du vivant que de la matière. Aujourd'hui Soleil constitue une des sources mondiales de rayonnement synchrotron les plus performantes et les plus dynamiques et accueille annuellement plusieurs milliers d'utilisateurs de toutes les disciplines, y compris les sciences humaines et sociales, aussi bien français qu'européens et d'ailleurs.

Cette contribution a l'ambition de présenter le rayonnement synchrotron, l'histoire de son développement en France depuis l'utilisation en « parasite » du faisceau de l'anneau de collision d'Orsay (ACO) en 1972 aux premiers photons de Soleil obtenus en 2006 ([http://\(www.synchrotron-soleil.fr\)](http://www.synchrotron-soleil.fr))

Généralités sur le rayonnement synchrotron

☞ *Le rayonnement synchrotron*

Toute particule relativiste (*dont la vitesse est proche de celle de la lumière*) chargée soumise à l'accélération centripète d'un champ magnétique émet un rayonnement électromagnétique, appelé rayonnement synchrotron (RS), dont les caractéristiques dépendent de sa vitesse et de sa masse. Le moyen le plus efficace de produire le RS est de forcer des particules légères (électron (e^-), positon(e^+) (*un positon est une particule ayant la même masse que l'électron, mais de charge opposée*), accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière, à circuler sur des trajectoires courbes, dans un anneau appelé anneau de stockage.

☞ *Bref Historique du rayonnement synchrotron en France*

Le RS a été observé pour la première fois en 1947 dans un anneau construit spécialement à General Electric (USA) et sa description théorique remonte à 1949. Cependant ce RS est bien connu (et autrefois maudit) par les physiciens des particules et des hautes énergies, en particulier ceux qui étudient les interactions entre particules dans les anneaux de collision : l'émission de RS constitue en effet une perte d'énergie «parasite» qui perturbe les expériences des physiciens des particules, alors que c'est justement ce RS qui est l'outil de caractérisation recherché par les utilisateurs de RS. C'est donc tout à fait naturellement que l'histoire et la genèse du RS en France prennent leur source dans et autour de l'accélérateur et des anneaux de collision d'Orsay.

C'est en 1955 que débute au LAL la construction par tranches successives d'énergie de 250 MeV (*1MeV : 1 Méga electronvolts : 1 eV est l'énergie d'un électron soumis à un potentiel d'un volt*) de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay (*LINAC*) destiné à produire des électrons et des positons de haute énergie. L'énergie du LINAC pour les électrons atteindra 2.3 GeV (*1 Giga eV : 1 milliard d'electronvolts*) en 1968, pour une longueur totale de 300m environ. Le LINAC injectera des particules dans 3 anneaux construits entre 1968 et 1987 : deux ont été conçus et construits pour réaliser des expériences de collision entre électrons et positons et seront ensuite reconvertis en sources de RS. Il s'agit de l'anneau de collision d'Orsay (*ACO*), où les particules sont accélérées à 540MeV, dont la construction a été achevée en 1968 et de *DCI (Dispositif de Collision dans l'Igloo)*, constitué de deux anneaux superposés, se croisant en deux points où se produisent les collisions (e^- , e^+) avec des particules accélérées à 1,85 GeV, achevés respectivement en 1975 et 1977.

Le 3^{ème} anneau a été conçu pour la production de RS et optimisé dans le spectre visible, l'ultraviolet et les X mous et tendres. Il s'agit de SuperACO construit en 1987 en remplacement du petit anneau ACO arrêté définitivement en avril 1988 reconverti en musée, géré par l'association Sciences-ACO créée en 1992.

☞ *Du LAL au LURE, l'aventure du rayonnement synchrotron en France*

Dès 1962, 6 années avant la construction d'ACO, le groupe du Professeur Yvette Cauchois, du laboratoire de Chimie Physique de l'Université de Paris, proposait d'installer un dispositif de production de rayonnement synchrotron sur l'accélérateur d'Orsay. Devant le refus des physiciens de ce dispositif qui risquait de perturber leurs propres expériences, le groupe se replia sur les RX produits par l'accélérateur circulaire d'électrons ADA de Frascati (Italie). C'est seulement en 1972 qu'une solution technique permettant d'installer une ligne de lumière sur un aimant dipôle de l'anneau ACO sans perturber les détecteurs de la physique des collisions ouvrait enfin les machines d'Orsay à la communauté des utilisateurs de RS. Les deux communautés ont ainsi travaillé en parallèle et établi un climat d'échange qui se perpétue encore à Soleil.

☞ *ACO, source de rayonnement synchrotron dans L'UV*

La première ligne de lumière, fournissant des photons dans le VUV (Ultra Violet Lointain et X mous) a démarré en 1973 et a démontré les avantages extraordinaires du rayonnement synchrotron par rapport aux sources classiques utilisées dans le même domaine d'énergie : flux intense de photons, grande brillance (les photons ne sont pas émis dans toutes les directions, mais sont concentrés dans un très petit angle solide), gamme spectrale étendue, grande stabilité de l'intensité des photons, lumière polarisée, structure pulsée des photons qui sont émis en paquets équidistants (cette structure temporelle sera largement utilisée dans des expériences résolues en temps aussi bien en biologie, qu'en physique et chimie de la matière diluée, notamment).

On peut retenir cette date comme le démarrage du rayonnement synchrotron en France, avec la création du LURE le 1^{er} mars 1974 et l'utilisation exclusive de ACO pour la production du RS. Ainsi commence le développement fulgurant du RS d'abord à Orsay, puis hors du campus. ACO comportera 12 postes expérimentaux pluridisciplinaires différents et stimulera un nombre impressionnant d'expériences nouvelles, de collaborations et de développements technologiques. Elle contribuera ainsi à créer et structurer une communauté interdisciplinaire qui regroupera autour de cet outil des centaines d'équipes résidentes et utilisatrices provenant de champs disciplinaires multiples, de laboratoires universitaires, CNRS et CEA répartis aux six coins de l'hexagone et de l'Europe. Signalons, par exemple, qu'en 2000, LURE avait accueilli 1800 utilisateurs extérieurs, dont le tiers provenait de la région parisienne et 20% environ de l'étranger (Communauté européenne ben majorité).

☞ *DCI, source de RX durs*

Tout en poursuivant les développements sur ACO, les chercheurs ressentent le besoin de disposer de lignes RS sur l'anneau de haute énergie DCI, délivrant des RX durs de courte longueur d'onde capables de sonder la structure atomique des matériaux. De ce fait, l'anneau DCI sera partagé entre les physiciens des particules et les scientifiques du RS, de sa mise en service en 1976 jusqu'à 1985 où il sera exclusivement affecté à la production du RS. A cette date, les machines et les personnels qui assurent leur fonctionnement, leur développement et leur maintenance seront transférées au LURE dans le cadre d'une convention LURE-LAL...et l'aventure du RS continuera à se développer de façon autonome, l'ambition étant de fournir aux utilisateurs un faisceau RS de plus en plus intense, de plus en plus brillant, avec des dimensions de plus en plus petites, capable de sonder des échantillons de taille de plus en plus réduite, couvrant un domaine d'énergie très étendu, de l'infrarouge aux RX les plus durs, afin d'étudier à l'échelle microscopique, nanoscopique et atomique les propriétés structurales, électroniques, magnétiques, optiques et vibrationnelles de la matière sous toutes ses formes.

Les premiers postes expérimentaux de DCI exploitent dès 1976 le faisceau X polychromatique pour des expériences d'absorption, de topographie en faisceau blanc donnant une image à haute résolution en quelques secondes ainsi que des faisceaux monochromatiques concentrés sur des petits échantillons pour la détermination de la structure cristallographique des protéines par diffraction X. L'accroissement de la demande a induit un développement fulgurant du nombre de stations expérimentales de DCI qui étaient de 20 en fonctionnement simultané au moment de l'arrêt définitif des accélérateurs du LURE en décembre 2003. Cette croissance a stimulé des recherches multidisciplinaires sur lesquelles je reviendrai, mais aussi des développements en instrumentation, en électronique, en mécanique, dans les techniques du vide, dans la conception de détecteurs, de composants optiques couvrant l'ensemble du domaine spectral des X durs à l'infrarouge. On peut considérer que DCI est à l'origine de l'essor du rayonnement synchrotron X en France ; les expériences pionnières qui y ont été réalisées avec succès ont su structurer des communautés d'utilisateurs en physique, en chimie, en biologie, en sciences des matériaux, attirer de nouveaux chercheurs, ancrer LURE dans la communauté scientifique et universitaire aussi bien en France qu'en Europe et impliquer le RS dans plusieurs applications industrielles et de nombreux projets de recherche et développement.

Cette recherche ne s'est pas cantonnée à l'hexagone, mais elle s'est inscrite dans un tissu européen étendu, regroupant non seulement les pays comme l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Suède, l'Italie en complément à leurs propres installations, mais aussi et surtout les autres pays pour lesquels LURE a été une rampe d'accès vers les grandes instruments et un facteur structurant de jeunes équipes disposant de faibles moyens. Il faut souligner que l'accès aux installations du LURE se fait exclusivement sur la base de projets expertisés par des Comités de spécialistes indépendants. Tout projet retenu est entièrement pris en charge par LURE, son financement étant assuré par le budget alloué par les 3 tutelles du laboratoire (CNRS 55%, CEA 25% et Ministère en charge de la Recherche 20%) pour les équipes françaises et par le contrat européen d'accès aux grandes installations pour les équipes de la Communauté Européennes et des pays associés. La figure 1, tirée de mon rapport à la réunion de la table européenne des centres de rayonnement synchrotron et des lasers libres, présente les projets européens déposés et retenus au Lure en 2000.

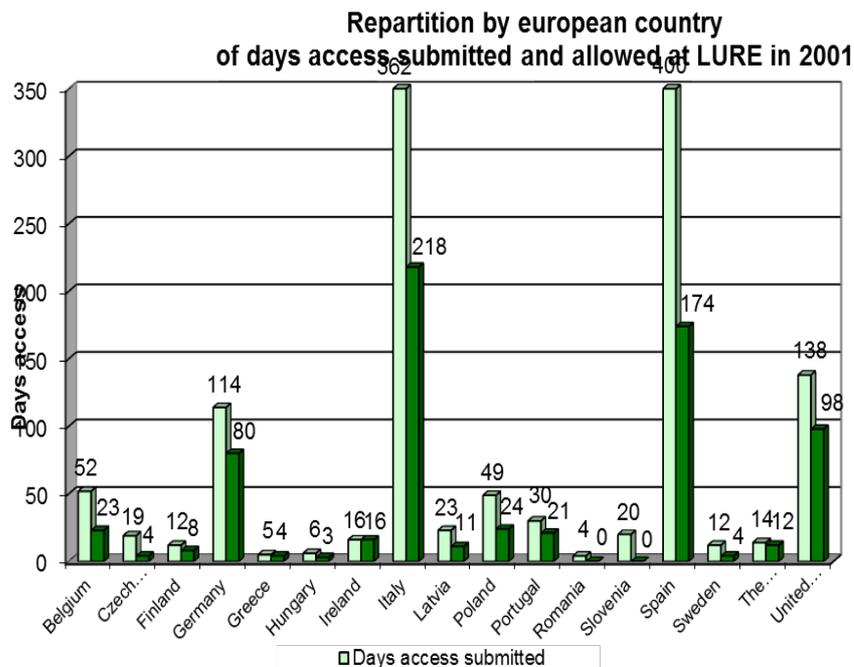


Figure 1 : Jours d'accès européens aux sources de LURE demandés et retenus en 2001

Cette mutualisation des compétences au niveau français et européen a été un facteur de développement scientifique, technologique et instrumental extraordinaire ; elle a eu un effet structurant remarquable avec la construction d'un centre de rayonnement synchrotron européen de très haute énergie (European Synchrotron radiation Facility, ESRF installé à Grenoble) complété par des installations de taille nationale comme Soleil en France, Diamond en Grande-Bretagne, Elettra en Italie, Desy et Bessy en Allemagne, Alba en Espagne, SLS en Suisse ... Elle a stimulé et continue à stimuler des collaborations interdisciplinaires productives, sources de nouvelles idées, de nouvelles expériences et instrumentations. J'ai participé au développement de cette stratégie de mutualisation des très grandes infrastructures de recherche telles que la RMN à très haut champ qui se regroupent en réseau et assurent l'accueil sur projets, comme les Très Grands Equipements de Recherche (Rayonnement Synchrotron, Neutrons). Cette mutualisation permet d'optimiser l'utilisation et l'exploitation des investissements lourds et de planifier leurs financements à long terme.

Des machines conçues et optimisées pour le rayonnement Synchrotron

Les résultats remarquables obtenus ont démontré l'utilité du rayonnement synchrotron comme outil mutualisé de caractérisation. A cette époque, le RS était obtenu sur des machines non optimisées pour sa production, conçues pour la physique des collisions. Dès la fin des années 1970, des projets de construction d'anneaux dits de troisième génération, dédiés uniquement à la production du RS ont commencé à mûrir et à être construits à travers le monde.

Ils devaient produire un rayonnement de très faible émittance, de très forte brillance, permettant de concentrer le maximum de photons dans le minimum d'angle solide, capable de sonder des échantillons micro et nanoscopiques ou de caractériser avec une grande résolution spatiale des échantillons hétérogènes. Ces exigences ne peuvent pas être satisfaites simplement en utilisant le rayonnement blanc émis par les aimants de courbure de l'anneau. Il faut au contraire multiplier les sections droites dans lesquelles peuvent être insérées des structures magnétiques périodiques calculées pour amplifier l'énergie extraite dans des domaines spectraux choisis *a priori*, pour des applications définies. La géométrie est de ce fait totalement différente de celle des anneaux de collision et se présente sous forme de sections droites raccordées par des déviations magnétiques, à tel point qu'aujourd'hui c'est le nombre et les dimensions des sections droites qui constituent

les paramètres de comparaison des sources. L'injection ne se fait plus par un accélérateur linéaire qui nécessite un grand nombre de sections accélératrices pour atteindre l'énergie nominale des électrons injectés dans l'anneau, mais par un injecteur plus modeste qui alimente un premier anneau appelé *booster* qui accélère les électrons avant leur injection dans l'anneau de stockage.

C'est ainsi que le projet SuperACO est né, suivi d'une participation active à l'ESRF de Grenoble, conçu comme le grand centre européen du synchrotron de haute énergie, (comparable aux sources APS et Sping'8 installées respectivement à (Argonne, USA et Himeji, Japon), devant être complété par des machines nationales plus petites, fonctionnant en réseau européen, indispensables pour couvrir les besoins croissants de la communauté scientifique européenne, notamment en Sciences de la vie, en sciences de l'environnement et en nanosciences.

☞ *SuperACO, premier anneau construit en France pour la production exclusive du rayonnement synchrotron*

Dès 1980, l'obsolescence prévisible de l'anneau ACO et l'impossibilité technologique d'en augmenter les performances ont nourri des réflexions pour la construction d'une nouvelle machine sur le site d'Orsay en s'appuyant sur l'infrastructure technique et les compétences humaines et instrumentales existantes : les équipes techniques du LURE et du LAL pouvaient construire la nouvelle machine et continuer à fournir les faisceaux aux utilisateurs en assurant le fonctionnement de ACO et DCI ; le Linac pouvait servir d'injecteur à la nouvelle machine en délivrant des positons à une énergie nominale de 800 MeV, optimisée pour la production de photons dans le visible, l'ultra violet, les X tendres et mous .

Le projet, fortement défendu par H. Curien, alors président du comité de direction du LURE, par J. Teillac président du comité des Grands Equipements et par P. Aigrain, Secrétaire d'Etat à la Recherche, a été construit très rapidement en 5 ans dans le cadre d'une convention CNRS-CEA-Ministère de la Recherche signée en 1983 et qui a géré LURE en tant qu'UMR 130 à statut dérogatoire, placée sous l'autorité d'un Conseil d'Administration.

Cette machine, baptisée SuperACO, complémentaire de DCI et de l'ESRF conçus pour la production de RX durs, comportait 8 sections droites dont 7 équipées d'éléments d'insertion, la 8^{ème} étant réservée au fonctionnement de la machine, en particulier à l'alimentation radiofréquence servant à compenser la perte d'énergie des particules à chaque révolution dans l'anneau.

20 expériences fonctionnaient en simultané sur SuperACO, dont un laser à électrons libres dans le visible et le proche UV et deux lignes infrarouges. Deux modes de fonctionnement de SuperACO permettent de satisfaire les demandes d'une très large communauté scientifique allant de la physique et de la chimie atomiques et moléculaires, à la physicochimie de l'environnement, à la catalyse, à la physique du solide et des surfaces, à la dynamique des protéines, à la photosynthèse, au magnétisme et ce de l'échelle atomique, à l'échelle nano et microscopique, aux sciences de la Terre et de l'espace. Des plans d'équipements complémentaires financés par le CNRS et des collaborations avec certaines régions (Ligne Grand Est financée dans le cadre d'une convention avec les régions Alsace, Lorraine, Bourgogne et des laboratoires de la région parisienne, Région Centre) et certains pays (ligne franco suisse installée dès 1992, ligne franco espagnole installée à partir de 1996) ont permis d'équiper SuperACO de postes expérimentaux performants dont certains ont transférés à SOLEIL ou cédés à d'autres sources comme SESAME (*Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East*), source en cours de construction en Jordanie, sous le parrainage de l'UNESCO, destinée à être exploitée par et à accueillir des ingénieurs, techniciens et chercheurs de la région.

☞ L'épopée du projet SOLEIL, en guise de conclusion

Dès 1990, les responsables du LURE mettent en place une commission « pour l'avenir du rayonnement synchrotron », chargée de définir les caractéristiques techniques de la source appelée à remplacer les machines vieillissantes du LURE au seuil du 3^{ème} millénaire. L'objectif est de construire une source, intégrant tous les progrès technologiques et instrumentaux, complémentaire de l'ESRF. Elle devait être optimisée pour produire des photons d'énergie intermédiaire et intégrer tous les développements instrumentaux et technologiques actuels pour répondre aux nouvelles demandes de la communauté, en particulier des sciences du vivant engagées dans l'ère du génome et du post génome.

Cette idée a mûri à travers des séminaires, des échanges entre les spécialistes machines et les scientifiques utilisateurs, des échanges avec les collègues européens engagés dans des projets similaires.

En 1991, le CNRS confiait l'évaluation des besoins de la communauté au « Comité de Prospective pour l'utilisation du rayonnement synchrotron en France ». Devant la conclusion positive de ce comité, la direction du LURE poursuit le travail préparatoire et publie aux Editions de Physique, en 1993, un document technique sur la machine et un document scientifique sur son utilisation. Le projet SOLEIL devient un projet officiel à l'issue des Conseils d'Administration du LURE de juillet 1994 et de décembre 1995. Soulignons que dès cette période, les tutelles (CNRS et CEA) ont choisi de séparer administrativement et statutairement, sinon géographiquement SOLEIL du LURE, en confiant à un groupe de projet autonome la réalisation de l'Avant Projet Détaillé de SOLEIL et en laissant ouverte la localisation du site dans tout l'hexagone, au risque de disperser les compétences concentrées au voisinage du LURE. Cette compétition ouverte entre les régions et les collectivités locales sur la seule base de leur contribution financière a contribué à populariser le projet, à sensibiliser et à impliquer les politiques dans ce projet de dimension nationale aux retombées économiques et sociales importantes. Le risque de confrontation entre les porteurs du projet des différentes régions a heureusement été évité par une concertation étroite entre les scientifiques concernés. L'enjeu était de disposer en France d'une source de 3^{ème} génération, et d'y associer les régions par des collaborations au niveau des lignes et des expériences. Les personnels du LURE se sont opposés, dans leur grande majorité, à cette séparation qui préfigurait déjà le statut de Société Civile actuel, avec le risque d'isoler SOLEIL du tissu scientifique et technique que constituent le CNRS et les Universités et d'en faire une usine à photons. Cette opposition ne les a pas empêchés de participer très activement au travail du groupe de projet, avec des collègues du CEA, convaincus de la nécessité de cette source et de leur responsabilité particulière pour sa défense et sa réalisation.

Les travaux remarquables du groupe projet ont duré 3 ans et abouti à une proposition de source aux performances exceptionnelles... que le ministre Allègre s'est empressé de geler, puis de sacrifier le 2 août 1998 à une participation minoritaire au projet britannique Diamond, au côté de Welcome Trust !

Le Groupe APD dissout, ses membres non Lurons dispersés, la défense de SOLEIL revenait naturellement à LURE, sa direction, ses personnels, ses utilisateurs et tous les collègues soucieux de ne pas priver la communauté scientifique d'un outil de caractérisation devenu indispensable. La lutte a duré deux ans et mobilisé les personnels du LURE à travers l'intersyndicale, la direction du laboratoire qui, les moyens de communication aidant, a pu réagir « en temps réel » à la déclaration aoûtienne d'Allègre. La mobilisation des utilisateurs a été déterminante dans le soutien aux actions multiformes qui ont été conduites et qui ont fini par sensibiliser la presse, la population les politiques et les syndicats, y compris au niveau confédéral. Il m'est difficile de rappeler dans le détail ces événements qui ont installé LURE et les Lurons sous le feu de la rampe pendant plusieurs mois (cf Agnès Traverse, Le Projet Soleil, Chronique et analyse d'un combat, L'Harmattan, 2007). Je tiens seulement à souligner le rôle prépondérant qu'a joué l'Office parlementaire d'Evaluation de Choix Scientifiques et technologiques qui a constitué une commission qui, après un travail rigoureux au cours duquel elle a confronté tous les dossiers, écouté beaucoup de scientifiques français et étrangers, visité plusieurs installations, a conclu à la

nécessité de construire SOLEIL. C'est à R.-G. Schwarzenberg que revient le mérite d'avoir décidé la construction de SOLEIL, à l'Orme les Merisiers, au voisinage de LURE (12 septembre 2001). Le statut de Société Civile a été retenu, tout agent du LURE devant avoir une proposition pour travailler à SOLEIL, s'il le désire. Les chercheurs et ITA ont dû mener une année supplémentaire d'action pour obtenir la création d'une Unité propre du CNRS (Unité de Recherche SOLEIL) destinée à accueillir les personnels appelés à travailler à SOLEIL, en restant affectés au CNRS.

Aujourd'hui Soleil fonctionne à plein régime, offrant aux utilisateurs de toute discipline des moyens de caractérisation et d'imagerie exceptionnels, utilisant des lignes de lumière de qualité ultimes, alimentées par des sources optimisées, intégrant les composants instrumentaux et conceptuels les plus récents qu'il contribue largement à développer en collaboration avec les autres centres européens et internationaux et participant de manière active à la structuration de la communauté scientifique nationale et européenne.