

# II. Les accélérateurs et les sources de lumière :

## Etat d'avancement

L'ensemble d'accélérateurs comprend :

- un injecteur qui est un LINAC à électrons de 100 MeV. Il a été construit par Thales en coopération avec EuroMeV, sur les spécifications de SOLEIL. Il a été conçu pour pouvoir injecter à 3 Hertz et en mode mono-coup, afin de permettre l'injection de l'anneau en continu (topping up).

Les premiers tests de production de faisceau ont été réalisés avec succès le 2 juillet 2005 : en quelques heures, les performances nominales ont été atteintes, au-delà des espérances.

- un accélérateur circulaire, le Booster, de 157 mètres de circonférence, qui augmente l'énergie des électrons injectés par le LINAC à 100 MeV jusqu'à 2.75 GeV, l'énergie de travail du synchrotron SOLEIL. Cet accélérateur injecte ensuite les paquets d'électrons dans le synchrotron. Il a été entièrement conçu par SOLEIL qui a aussi été le maître d'œuvre pour sa construction. Il a été installé au printemps 2005.

Le 23 juillet, un premier essai a eu lieu avec un complet succès: le faisceau du LINAC a été stocké dans le Booster à 100 MeV et les paquets d'électrons, mis en forme dans la cavité RF qui compense les pertes d'énergie, ont pu effectuer plusieurs milliers de tours. Ceci nous rend donc extrêmement confiants pour l'étape suivante, celle de la montée en énergie à 2.75 GeV qui est prévue en Septembre.

- la source de rayonnement synchrotron, appelée communément le synchrotron SOLEIL, est en fait un Anneau de Stockage des électrons à 2.75 GeV, optimisé pour l'émission de rayonnement synchrotron. Cette machine de 354 m de circonférence a été elle aussi entièrement conçue et construite par SOLEIL. Elle est beaucoup plus complexe que le Booster.

Le rayonnement est émis dans les 32 aimants de courbure, mais surtout dans les onduleurs qui sont des sources plus brillantes de plusieurs ordres de grandeur. Les onduleurs sont des structures magnétiques périodiques linéaires dans lesquelles chaque électron rayonne de manière cohérente à chacune des oscillations de sa trajectoire, d'où la brillance accrue : l'émission en régime cohérent caractérise les synchrotrons dits de troisième génération. Elle implique un contrôle des trajectoires des électrons à l'échelle du micron et une très forte focalisation des faisceaux d'électrons pour minimiser les dimensions transverses et la dispersion angulaire des paquets d'électrons, laquelle doit être inférieure à quelques  $10^{-5}$  radians. Ces caractéristiques des synchrotrons de troisième génération expliquent leur complexité.

L'équipe de SOLEIL a beaucoup travaillé pour optimiser les performances de l'Anneau en fonction des besoins des expériences qui utiliseront les faisceaux, en intégrant tous les développements récents et l'expérience de ses prédécesseurs, et en innovant sur un certain nombre de points. La machine devrait être la meilleure machine au monde dans sa gamme d'énergie, avec peut-être Diamond en construction à Oxford.

Le montage des équipements dans le tunnel de l'Anneau a commencé début juillet, dès que celui-ci a été disponible. Il devrait se terminer en mars 2006 avec la fin des essais des divers équipements et permettre alors le début du commissioning (essais et réglages avec faisceau).

# **1. Les exigences pour les sources de photons et leur satisfaction dans la conception de SOLEIL**

**- Couvrir avec des onduleurs une très large gamme d'énergie de photons, et être complémentaire de l'ESRF dont l'émission est centrée sur les rayons X durs et très durs.**

Ceci a été obtenu par :

- 1) l'optimisation de l'énergie de l'anneau à **2.75 GeV** (en comparaison : 6 GeV à l'ESRF), ce qui permet de couvrir de l'ultra-violet (à partir de 5 eV) aux rayons X relativement durs (20 keV),
- 2) l'introduction de 4 grandes sections droites de 12 mètres de long pour pouvoir y installer des onduleurs de grande période pour la production de rayonnement VUV,
- 3) l'optimisation des onduleurs en fonction de leur domaine d'énergie en 3 grandes catégories (cf. paragraphe sur les onduleurs).

**- Avoir le plus grand nombre possible de sections droites pour des onduleurs.**

SOLEIL dispose de 24 sections droites couvrant 160 m sur les 354 m de circonférence de l'Anneau, dont 21 sont disponibles pour des onduleurs. L'optimisation de l'optique de l'anneau a permis d'avoir 4 sections de 12m dont 3 disponibles pour des onduleurs, 12 de 7m dont 10 disponibles pour les onduleurs X mous et tendres et 8 petites sections droites de 3.6m optimisées pour des onduleurs pour les X durs (grande fonction bêta-tron favorisant l'utilisation d'harmoniques élevées de l'onduleur). SOLEIL propose le plus fort ratio entre la longueur totale disponible pour les onduleurs et la circonférence totale (29 %).

**- Permettre le fonctionnement en mode à quelques paquets pour des études résolues temporellement.**

A l'échelle de la dizaine de picosecondes, cette demande a pu être satisfaite avec un mode de fonctionnement à 8 paquets de 30 ps (largeur à mi hauteur) et un courant de 90 mA. Ce mode sera utilisé de l'ordre de 20 à 30 % du temps, en fonction des besoins scientifiques.

Récemment sont apparues plusieurs idées nouvelles pour créer des paquets de durée picoseconde, voire jusqu'à 200 femto-secondes. Elles sont présentement en cours d'investigation à SOLEIL.

**- Evidemment, avoir des faisceaux de photons les plus brillants et les plus stables possibles.**

## **2. Les principales caractéristiques de l'anneau**

Les exigences de brillance ont dominé toute l'optimisation de l'anneau et de ses injecteurs ainsi que celle des onduleurs, mais ont aussi imposé la conception du bâtiment du synchrotron. Les paramètres principaux de l'anneau sont donnés dans le tableau I, ci-dessous.

Energie	2.75 GeV
Circonférence	354.1 m
Emittance horizontale (rms)	$3.7 \cdot 10^{-9}$ m rad
Emittance verticale (rms)	$37 \cdot 10^{-12}$ m rad
N de cellules et super périodes	16 / 4
Sections droites	4 x 12 m; 12 x 7 m; 8 x 3.6 m
Courant avec 416 paquets	500 mA
Courant avec 8 paquets	90 mA
Taille horizontale FWH ( $\mu\text{m}$ )	100 (aimant)
Taille verticale FWH ( $\mu\text{m}$ )	19 (onduleur)
Longueur des paquets (FWHM)	30 ps
Durée de vie effective	16h minimum

**Tableau I** : Principales caractéristiques de l'anneau

Le paramètre principal est l'émission transverse horizontale du faisceau électronique qui doit être minimisée pour permettre un fonctionnement des onduleurs en régime cohérent sur une grande longueur. Elle dépend directement de la longueur de la circonférence de l'anneau, ce qui est défavorable pour SOLEIL du fait de sa petite taille de 354 m (en comparaison, la circonférence de Diamond est 60 % plus longue). L'optimisation de la maille magnétique de l'anneau a cependant résulté en une faible valeur ( $3.7 \cdot 10^{-9}$  m rad). Comme cela est montré sur la Figure 1, elle permet d'obtenir la brillance souhaitée, de l'ordre de  $10^{20}$  photons/ mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/sec / $\Delta E/E=10^{-3}$  dans le domaine d'excellence de SOLEIL, celui des X tendres (1-4 keV).

L'optique de l'Anneau permet aussi d'adapter les dimensions transverses des paquets d'électrons aux besoins spécifiques des différents types d'onduleurs. Ainsi, une dimension verticale très faible (16  $\mu\text{m}$ ) est obtenue dans les onduleurs sous vide pour les X durs afin de permettre de travailler avec des gaps magnétiques faibles, tandis que la dimension horizontale est élargie pour permettre une dispersion angulaire suffisamment faible dans le plan horizontal pour ne pas brouiller les harmoniques élevés nécessaires en X durs.

L'optique linéaire et les effets non-linéaires ont été particulièrement travaillés pour obtenir des faisceaux stables au micromètre près dans le plan vertical, tout en préservant une durée de vie dépassant 16 heures. De ce fait, les tolérances magnétiques dans les quadripôles magnétiques qui sont les lentilles de focalisation du faisceau, sont particulièrement serrées. Ces équipements critiques ont été mesurés à SOLEIL : nous sommes très satisfaits de leur réalisation, toutes les spécifications sont obtenues. Cette optimisation a aussi impliqué le développement, en collaboration avec le CEA, d'une cavité supraconductrice conçue pour permettre de stocker 300 mA. Cette cavité a été testée avec succès à l'ESRF et sera installée sur l'anneau. Une deuxième cavité est commandée pour pouvoir stocker 500 mA.

L'effort principal a porté sur la stabilité des faisceaux d'électrons afin d'obtenir une stabilité du faisceau de lumière X émis de l'ordre du micron dans le plan vertical qui est le plus critique vue la petite taille transverse verticale du faisceau d'électrons : cette optimisation a été intégrée dans la conception de l'Anneau (sur tous les équipements y compris les capteurs de position), dans celle des onduleurs et des optiques des lignes de lumière, mais aussi dans celle de tous les supports mécaniques jusqu'à la conception du bâtiment lui-même. Pour donner quelques exemples, cette exigence implique de stabiliser la température au dixième de degré dans le tunnel de l'Anneau où sont dissipés près de 2 Megawatts de puissance thermique. Elle nécessite aussi que le bâtiment soit stable au micron près sur 10 mètres, ce qui s'est avéré être un challenge, challenge réussi mais coûteux ! Pour s'affranchir des mouvements des marnes du plateau de Saclay, nous avons en effet dû ancrer le bâtiment sur 600 pieux de près d'un mètre de diamètre descendant à 16 mètres jusqu'à trouver le sable de Fontainebleau, et faire flotter la dalle de 1 mètre de béton armé au dessus du sol!

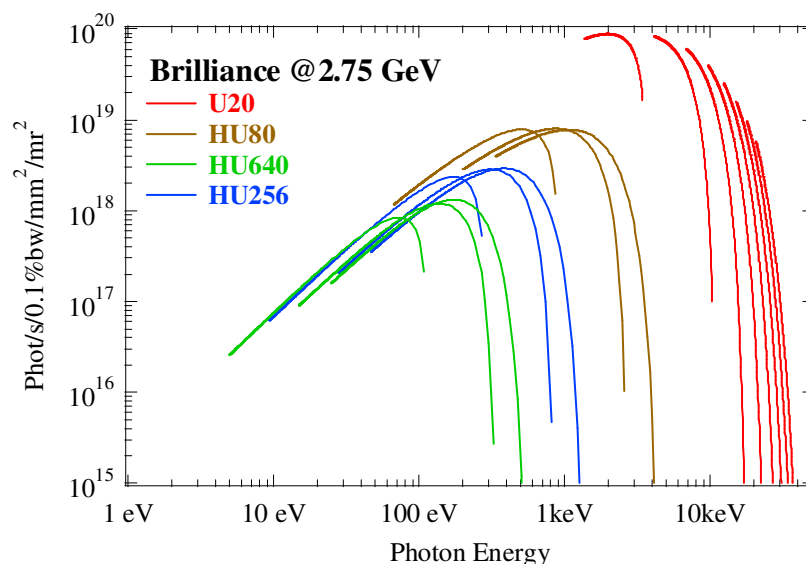
Un des problèmes les plus critiques est la dérive du faisceau de photons induite par des dérives de la trajectoire du faisceau d'électrons dans les quadripôles magnétiques et par des instabilités des optiques des lignes de lumière. Toutes résultent des dilatations dues à la variation de la

puissance thermique rayonnée avec la décroissance du courant stocké. Quelles que soient les précautions prises dans la conception, elles entraînent des déplacements du faisceau en termes de dizaines de microns sur quelques heures. Ceux ci sont réduits d'un à deux ordres de grandeur si on maintient constante l'intensité du faisceau stocké, comme cela a été démontré récemment sur la machine suisse SLS. Nous avons donc décidé de travailler ainsi, en mode dit de « topping up » qui consiste à injecter régulièrement dans l'Anneau (toutes les deux minutes) une petite quantité d'électrons pour compenser ceux perdus. Ceci a impliqué de modifier la conception du Booster et de l'accélérateur linéaire pour permettre cette injection quasi continue.

### 3. Les onduleurs

Leur conception et leur réalisation ont fait l'objet d'efforts très particuliers de façon à optimiser la brillance des faisceaux de photons émis, mais aussi les propriétés de polarisation ou de pureté spectrale en fonction des besoins scientifiques, en intégrant les caractéristiques des optiques qui manipulent ces faisceaux dans les lignes de lumière (notamment l'optimisation de la puissance émise en fonction de la capacité des optiques à la supporter). Ceci a concerné aussi bien le design magnétique que la réalisation mécanique (stabilité). De ce fait, les utilisateurs de SOLEIL disposeront des meilleurs onduleurs qui sont concevables à ce jour.

3 grandes catégories d'onduleurs ont été définies en fonction de la longueur d'onde souhaitée : leurs brillances sont données ci dessous dans la figure 1. Leurs performances seront parmi les meilleures au monde, si ce n'est les meilleures, depuis l'UV lointain jusqu'aux rayons X d'énergie modérée, quelques keV. Dans le domaine des X durs, Soleil reste une machine de bonne brillance jusque vers 15-20 keV.



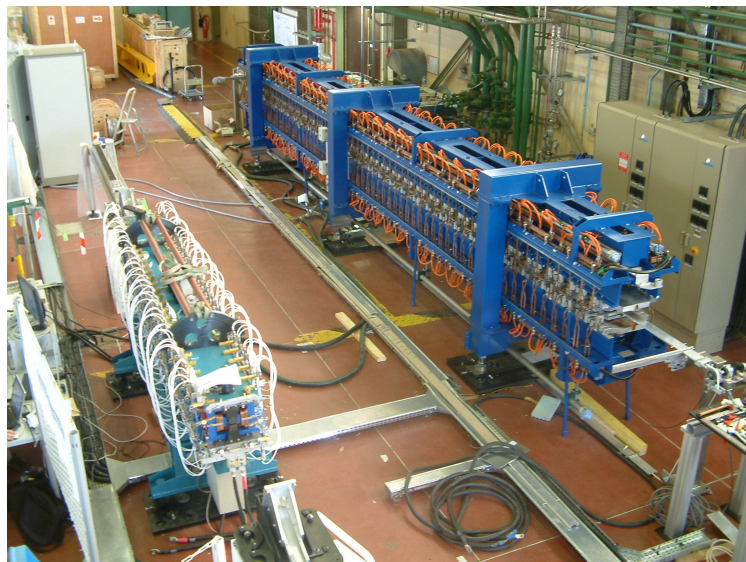
**Figure 1 :** Brillance des onduleurs de phase I, pour l'émission fondamentale et celles des harmoniques utilisables

Pour le VUV à partir de 5 eV et les X mous jusqu'à 1 keV, SOLEIL a réalisé des onduleurs électromagnétiques de grande période (640 et 256 mm) de conception originale. La figure 2 montre un exemplaire de chacun d'eux en cours de cartographie magnétique à SOLEIL.

Ces onduleurs fournissent toutes les polarisations du faisceau de photons (linéaires, circulaires et elliptiques) avec une grande pureté spectrale. A cet effet, des bobines auxiliaires permettent de rendre une des composantes du champ magnétique faiblement pseudo-périodique de façon à déplacer l'énergie des harmoniques par rapport aux multiples de la fréquence fondamentale et à permettre ainsi leur réjection par les monochromateurs. L'ondulateur HU 640, dont l'émission

descend jusqu'à 5 eV, est de conception particulièrement originale, avec trois batteries de bobines sans noyau de fer permettant de renverser la polarisation du faisceau de photons à la fréquence du Hertz.

A ce jour, les premiers onduleurs HU 640 et 256 ont été réceptionnés. Leur cartographie magnétique est en cours à SOLEIL. Les premiers résultats indiquent que toutes les spécifications sont remplies.



**Figure 2** : Les onduleurs électro-magnétiques HU 640 de 9 m de long (bleu sombre) et HU 256 (bleu clair) dans le hall de mesures magnétiques de SOLEIL.

Pour les X mous et tendres de 100 eV à 1.5 keV, des onduleurs de période de 5 à 8 cm ont été choisis, ce qui permet d'utiliser des aimants permanents. Leur conception (design du type APPLE2) permet aussi d'obtenir toutes les polarisations et d'avoir une distribution quasi périodique du champ magnétique.

Pour les X durs, l'énergie modérée de l'anneau (2.75 GeV) implique d'avoir des onduleurs de courte période (2 cm). La faible période et le besoin d'un champ magnétique de 1 T nécessitent de minimiser au maximum le gap vertical entre les deux mâchoires d'aimants (5.5 mm à SOLEIL), et donc de les installer à l'intérieur de la chambre à vide de l'anneau. Ces onduleurs n'émettront que des faisceaux de photons polarisés linéairement horizontalement. Du fait de l'énergie de SOLEIL, ces onduleurs sont particulièrement performants dans le domaine des X tendres de 1 à quelques keV qui est le domaine d'excellence de SOLEIL. La brillance atteint alors  $10^{20}$  photons/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/sec / $\Delta E/E=10^{-3}$ , cf. Figure 1.

Pour atteindre des X plus durs, il sera nécessaire de travailler avec des harmoniques élevées, comme le montre la figure 1; pour ne pas élargir la largeur spectrale des harmoniques, il faut pousser au maximum leur optimisation magnétique en vue d'avoir un champ parfaitement sinusoïdal, mais le résultat dépend aussi directement de la qualité du faisceau d'électrons (minimisation de l'émittance transverse du faisceau et de la dispersion en énergie des électrons, stabilité en position). L'expérience récente obtenue sur la machine SLS en Suisse avec la ligne LUCIA, que Soleil a installée en collaboration avec le CNRS et le LURE, montre qu'il peut être possible de travailler avec des harmoniques d'ordre 15 !

Pour compléter la gamme d'énergie de photons offerte par les insertions de SOLEIL vers les X très durs (50-70 keV), un wiggler supraconducteur de période 4,2 cm produisant un champ maximum sur l'axe de 2,5 T est à l'étude pour la ligne « Conditions Extrêmes » de fin de phase 2.