

POINT FORT

Vers la génération d'impulsions femtoseconde à SOLEIL*

Dans un synchrotron de 3^e génération en fonctionnement normal, les durées d'impulsion de photons permettent d'étudier des phénomènes dynamiques à l'échelle de plusieurs dizaines de picosecondes. Cependant, grâce à une nouvelle technique appelée le « slicing », il devient possible de produire des impulsions sub-picoseconde assez courtes pour sonder des structures dynamiques ultra-rapides.

SOLEIL est une source de rayonnement synchrotron émis sous forme d'impulsions de très courte durée dont la largeur temporelle est déterminée par celle des paquets d'électrons circulant dans l'anneau de stockage. Pour des raisons intrinsèques à la dynamique des électrons dans les anneaux de stockage, il est très difficile en fonctionnement normal d'obtenir des largeurs temporelles des paquets d'électrons en dessous de 30 picosecondes ($ps = 10^{-12}$ sec) FWHM(1). Les durées d'impulsion de photons correspondantes, si elles permettent d'étudier un grand nombre de phénomènes dynamiques, sont trop longues pour sonder des structures dynamiques ultra-rapides comme les réactions chimiques, les transitions de phase, les changements rapides de structure dans les cristaux et d'autres phénomènes intra-atomiques qui se passent à l'échelle de 100 femtosecondes ($fs = 10^{-15}$ sec). Contrairement aux synchrotrons de 3^e génération, les sources de 4^e génération comme les lasers à électrons libres basés sur des accélérateurs linéaires sont capables de produire des impulsions femtoseconde. Mais une nouvelle technique appelée le « slicing » permet de produire des

impulsions sub-picoseconde sur anneau de stockage.

Principe du « Slicing »

On fait propager simultanément une impulsion laser puissante et ultracourte (~50 fs - FWHM) et un paquet d'électrons (30 ps) oscillant dans la structure magnétique périodique d'un wiggler (dit « modulateur ») (figure 1). Les électrons qui subissent le champ électromagnétique du laser changent d'énergie, car dans le wiggler leur vitesse acquiert une composante transverse, parallèle au champ électrique du laser. Certains électrons gagnent de l'énergie et d'autres en perdent. Cela ne concerne que les électrons qui pénètrent dans le wiggler au même moment que l'impulsion laser (dans la « tranche » de 50 fs).

Lorsque le paquet d'électrons traverse ensuite une zone de champ magnétique dispersif (aimant de courbure) ou une zone où la fonction dispersion est non nulle, la modulation en énergie, générée à l'intérieur du wiggler, est transformée en une séparation spatiale ou angulaire entre les trajectoires des électrons de la tranche et de ceux du faisceau « cœur » n'ayant pas subi l'action du laser. Ainsi on peut séparer spatialement le rayonnement produit par ces différents électrons dans un « radiateur » qui peut être un aimant de courbure ou un onduleur (figure 1).

Cette technique, validée expérimentalement à l'ALS (Berkeley, USA), est actuellement en opération sur des sources comme BESSYII (Allemagne), SLS (Suisse), le nouveau projet de l'ALS, et sur UVSOR (Japon). Toutefois, comme l'interaction laser-électrons ne se fait qu'avec une petite partie du faisceau d'électrons, le flux de photons issu de la tranche est par conséquent faible par rapport à celui produit par tout le

faisceau d'électrons. Les valeurs rapportées des expériences citées ci-dessus sont autour de 10^5 photons/s/0.1% b.p(2) pour des durées d'impulsions entre 150 et 200 fs FWHM.

Le projet Femto-Slicing à SOLEIL se distingue des autres projets par au moins trois points importants :

- plusieurs lignes de lumière pourront utiliser simultanément ces impulsions ultracourtes. Il s'agit au départ de CRISTAL (4 à 30 keV) et TEMPO (50 eV à 1,5 keV), deux lignes de phase 1 respectivement intéressées par la diffraction à l'échelle sub-picoseconde et la spectroscopie résolue en temps des électrons. Dans un 2nd temps, les lignes DEIMOS et GALAXIES pourront aussi en bénéficier. Cela permettra de produire à SOLEIL des impulsions fs couvrant la gamme d'énergie des rayons X mous et durs.

- la séparation entre les électrons de la tranche et ceux du faisceau cœur est effectuée dans le plan horizontal sans aucun élément magnétique supplémentaire, car elle tire profit de l'optique linéaire de l'anneau qui présente une dispersion horizontale naturelle non nulle dans toutes les sections droites.

- le rayonnement émis par le wiggler modulateur sera utilisé en routine et de façon indépendante comme une source de lumière pour une ligne spécifique, la ligne PUMA (étude des matériaux anciens).

Le modulateur

Les paramètres magnétiques et géométriques pour le choix du wiggler modulateur doivent prendre en compte un

Dernière minute

* Le budget de ce projet ambitieux n'est actuellement pas disponible sur les ressources propres de SOLEIL, le Conseil d'Administration du 2 mars 2011 ayant demandé de trouver des financements extérieurs pour le réaliser.

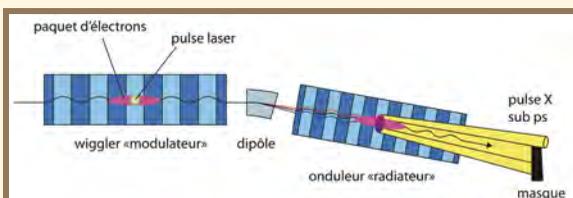


Figure 1 : schéma de principe de la méthode « slicing » pour générer des impulsions de rayonnement synchrotron femtoseconde (d'après S. Khan, EPAC 2002).

certain nombre de contraintes. Le wiggler doit émettre du rayonnement à la même longueur d'onde que celle du laser (800 nm), la puissance totale rayonnée doit être en dessous de la limite acceptable par la tête de ligne et les performances de l'anneau en termes d'émittance et de durée de vie doivent être préservées. De plus, le wiggler doit permettre d'obtenir un haut flux de photons jusqu'à 50 keV pour répondre aux spécifications de la ligne PUMA. Les études magnétiques et de dynamique de faisceau ont convergé vers un wiggler de période magnétique 164 mm, de 3,28 m de longueur et de champ magnétique maximum de 1,63 T. La puissance émise sera de 20 kW.



Figure 2 : localisation de la cabane laser slicing, du wiggler modulateur et des lignes de lumière impliquées.

Le laser

Le laser doit pouvoir délivrer des impulsions ultracourtes et une énergie à la sortie suffisamment grande pour assurer une séparation efficace entre la tranche et le cœur. De plus, puisque la fréquence de passage des paquets est très élevée (352 MHz) et que le flux attendu des impulsions fs est plutôt faible, il est important que la fréquence de répétition du laser soit la plus élevée possible. Le tableau 1 résume les principales spécifications retenues pour le système laser choisi.

La cabane qui abritera le système laser du projet Femto-Slicing sera lo-

calisée dans la galerie technique intérieure du synchrotron (figure 2).

Transport du faisceau laser

Le faisceau du laser sera transporté sous vide depuis la sortie de sa cabane pour être injecté au niveau du wiggler. Il doit donc traverser le mur intérieur de radioprotection de l'anneau de stockage et un blindage de radioprotection va être installé au niveau de cette pénétration. Pour permettre l'introduction du faisceau laser dans le vide de l'anneau une nouvelle chambre à vide d'un aimant dipôle est en cours de réalisation. Les études pour le transport du faisceau laser, son alignement et sa focalisation dans le wiggler sont également en cours. De plus, le laser doit être aligné temporellement, spectralement et spatialement sur le faisceau d'électrons dans le wiggler. Pour cela, une ligne diagnostics IR sera installée sur la sortie 0° du wiggler.

Le laser et le rayonnement synchrotron du wiggler à 800 nm seront extraits, à très faible courant, à l'aide d'un miroir escamotable, puis transportés jusqu'à une station de diagnostic pour la mesure temporelle, spectrale et spatiale. Pour mesurer en temps réel et optimiser l'efficacité du slicing avec un fort courant dans l'anneau, on utilisera une méthode indirecte, l'analyse du rayonnement synchrotron cohérent (CSR) dans le domaine THz généré dans les dipôles de l'anneau. L'intensité du rayonnement CSR est directement reliée à l'efficacité de la modulation en énergie dans le wiggler. L'extraction du rayonnement THz s'effectuera sur la sortie dipôle de la ligne Diagnostics Machine MRSV (Miroir Rayonnement Synchrotron dans le Visible) déjà existante.

Utilisation du rayonnement femtoseconde

Le slicing sera exécuté sur un paquet d'électrons de 10 mA avec l'anneau rempli soit en mode mono paquet, soit en mode 8 paquets à 90 mA, soit en mode hybride à 390 mA + 10 mA.

Les performances en terme de flux de photons doivent être calculées avec précision et en y incluant tous les

paramètres nécessaires. Toutefois, de premiers calculs donnent des flux sur échantillon entre 10^6 et 10^7 photons/s/0.1% b.p.

La durée de l'impulsion totale espérée au niveau des lignes de lumière CRISTAL et TEMPO est donnée dans le tableau 2, en tenant compte des différentes contributions indépendantes.

Synchronisation

Comme les expériences réalisées sur les lignes CRISTAL et TEMPO seront du type « pompes-sondes » (stimulation d'un échantillon par un faisceau laser, avant analyse par le faisceau de photons fs), il sera nécessaire de synchroniser les impulsions des lasers de stimulation avec l'impulsion du laser slicing avec une précision de quelques dizaines de fs. Etant donné les grandes distances entre les différents systèmes (~50 m) cela reste une des difficultés majeures à maîtriser. Plusieurs solutions sont à l'étude.

Autres utilisations du laser slicing

Le laser utilisé pour générer les impulsions courtes présente des caractéristiques exceptionnelles en terme de puissance et de taux de répétition qui en font un outil très intéressant pour des utilisations complémentaires lorsqu'il ne sera pas utilisé pour le slicing :

- des expériences sur la ligne PLEIADES, couplant le rayonnement synchrotron et le laser pour des expériences de spectroscopie en champ fort,
- des expériences, hors rayonnement synchrotron, en générant des harmoniques d'ordre élevé dans les gaz (HHG) pour des expériences en phase diluée et d'imagerie.

Les responsables du projet Femto-Slicing sont Amor Nadji (côté Sources) et Jan Luning (côté Expériences), assistés respectivement par Marie-Emmanuelle Couprie et Pascale Prigent.

1. FWHM : full width at half maximum, en français "largeur à mi-hauteur"
2. b.p : bande passante

→ Contact :

amor.nadji@synchrotron-soleil.fr

Tableau 1 : caractéristiques principales du système laser de SOLEIL

Longueur d'onde centrale (nm)	800 Titane : Saphir
Durée minimale de l'impulsion (FWHM) (fs)	30
Energie à la sortie à 800nm (mJ)	5
Fréquence de répétition (kHz)	10

Tableau 2 : durée totale de l'impulsion (FWHM en fs)

Radiateur	Laser	Slippage	Emittance	Dispersion en énergie	Total
CRISTAL	50	53	54	52	104
TEMPO	50	53	47	117	145