

## POINT FORT

## Stabilité du faisceau d'électrons : les systèmes de « feedback »

La stabilité du faisceau d'électrons est l'un des critères de qualité d'un synchrotron. Elle nécessite de maîtriser d'une part les perturbations qui peuvent modifier la position du faisceau, et d'autre part les instabilités intrinsèques aux paquets d'électrons qui peuvent affecter ses dimensions. Les équipes des Sources de SOLEIL ont mis en place plusieurs systèmes permettant de toujours contrôler et améliorer cette stabilité. Des efforts payants.



Installation du système de feedback transverse vertical, en mars 2008. De gauche à droite : Manh Huy N'Guyen (groupe Ultravide), Daniel Lefèbre et Carlos De Oliveira (groupe Conception Ingénierie)

### Les feedbacks d'orbite

La stabilité de position du faisceau d'électrons est déterminante pour les performances d'une machine de rayonnement synchrotron. Pour ne pas perturber les scientifiques sur les lignes de lumière, les fluctuations de la position et de l'angle du faisceau d'électrons doivent être inférieures à 10% de sa taille et divergence. À SOLEIL, la taille du faisceau atteignant de très faibles dimensions, de l'ordre de 8  $\mu\text{m}$  en vertical (pour un couplage de 1 %), le faisceau ne doit donc pas se déplacer de plus de 0,8  $\mu\text{m}$ ! Lors du design de la machine, toutes les précautions ont été prises pour assurer la meilleure stabilité possible : dalle de l'anneau isolée du bâtiment synchrotron et reposant sur près de 600 pieux à 15 m de profondeur ; modes propres des poutres, sur lesquelles sont installés tous les éléments de l'anneau, repoussés à des valeurs élevées pour minimiser l'amplification des vibrations du sol ; réflexion de la route voisine ; régulation de la tem-

pérature du tunnel à 0,1° C près ; injection en mode top-up, etc. Les systèmes de rétro-action - on parle de « feedbacks » - d'orbite, dernier maillon de cette chaîne, permettent de corriger les dérives de position du faisceau d'électrons en la ramenant le plus près possible de l'orbite de référence.

Disponible depuis le démarrage de la machine en janvier 2007, le feedback lent utilise les 56 correcteurs principaux de la machine : des bobines situées dans les sextupôles. Toutes les 10 secondes, les orbites horizontale et verticale sont relues sur les 120 moniteurs de position de l'anneau (« beam position monitor », BPM) et le système calcule le courant à envoyer dans les correcteurs pour les ramener au plus près des orbites de référence. Il est efficace dans la bande de fréquence de 0 à 0,05 Hz, et permet de corriger les dérives lentes de position du faisceau dues par exemple à des variations de température ou à des déformations de la machine.

Depuis septembre 2008, le feedback rapide est également utilisé. Il agit sur un autre ensemble de 48 correcteurs « à air » (ensemble de bobines placées dans l'air sans culasse magnétique), situés à chaque extrémité des sections droites. Dans ce cas, les orbites sont relues et la correction appliquée 10 000 fois par seconde. Ce feedback est efficace dans la bande de fréquence de 0 à 200 Hz. Il permet de corriger des phénomènes perturbateurs de fréquences plus élevées : vibrations du sol, déformation de la machine lors de l'utilisation des ponts roulants, 50 Hz du sec-teur, perturbations lors des transitions de changement de configuration des

onduleurs et même les séismes ! Pour ce système, comme le temps de calcul disponible est très faible, un réseau de communication dédié reliant les modules électroniques des 120 BPM a dû être développé, et il a fallu distribuer l'algorithme de calcul au sein de ces mêmes unités. Ainsi, en moins de 100  $\mu\text{s}$ , les données des 120 BPM sont distribuées autour de l'anneau, et les nouvelles consignes calculées et envoyées aux 48 correcteurs.

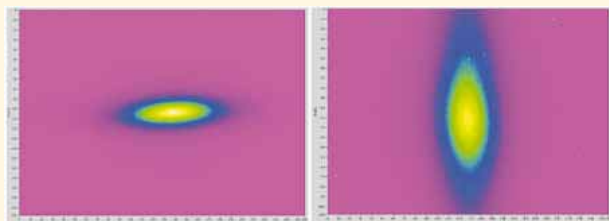
Ces systèmes de feedback d'orbite lent et rapide mettent en jeu plus de 300 acteurs différents (BPM, correcteurs, cartes de synchronisation, moniteur de courant). Leur supervision permanente est donc nécessaire pour garantir la fiabilité du système.

Habituellement, l'utilisation simultanée de deux systèmes de feedback d'orbite rend obligatoire la présence d'une bande de fréquence dite « morte » aux alentours de 0,1 Hz, dans laquelle les corrections sont inefficaces. Notamment, les perturbations dues aux changements de configuration des ondulations n'auraient pu être corrigées. À SOLEIL, une interaction software a été mise en place entre les deux systèmes, leur permettant d'agir de façon complémentaire et les rendant ainsi compatibles et donc efficaces sur la totalité de la bande de fréquence de 0 à 200 Hz. Cette interaction est une première.

### Le feedback transverse

SOLEIL fonctionne principalement avec deux modes de remplissage de l'anneau : le mode « multi paquets » avec pour objectif 500 mA distribués dans un grand nombre de paquets

Images des dimensions transverses du faisceau (pinhole) avec et sans (à droite) feedback transverse.



d'électrons, et le mode « structure temporelle » comportant un petit nombre de paquets (1 ou 8). Alors que le système radio-fréquence (RF) utilise des cavités accélératrices dont le design a été spécialement conçu pour éviter les instabilités multi paquets dans le plan longitudinal, il était nécessaire de réaliser un système de feedback très performant dans le plan transverse pour combattre les instabilités dans ces deux modes :

- « Multi paquets » : l'instabilité vient de l'interaction du faisceau avec les chambres à vide (plus précisément avec les champs électromagnétiques haute fréquence induits par le faisceau dans les chambres à vide). Il y a aussi

les instabilités extrêmement violentes dues à l'interaction des électrons avec des ions (présents dans le vide résiduel) à travers un seul passage d'un train de paquets d'électrons.

- « Structure temporelle » : il s'agit de modes d'oscillations cohérentes internes aux paquets. Un couplage des différents modes peut provoquer une forte explosion de la taille du faisceau. Considérant les performances ambitieuses de SOLEIL en termes de courant total et par paquet d'électrons, et la petite ouverture verticale adoptée pour les chambres à vide, la simulation avait prédit des seuils d'instabilités à des courants relativement bas. Il a donc été décidé de développer un système de feedback numérique paquet par paquet très performant.

Le système de base comprend un détecteur de mouvement très rapide du faisceau (BPM), une interface RF, un système digital à base de FPGA<sup>1</sup>, un kicker constitué d'électrodes (pour agir sur le faisceau), et des amplificateurs de puissance. Le système digital choisi a été développé au synchrotron japonais SPring-8. À partir des mesures du mouvement bêatron de chaque paquet, il réalise le filtrage nécessaire permettant de réinjecter à chaque tour un signal stabilisateur sur

ledit paquet. L'ensemble de ces opérations est réalisé par un FPGA avec une latence de moins d'un tour. Trois chaînes sont disponibles actuellement, équipées de kickers de type stripline dont deux ont été spécialement conçus et développés à SOLEIL pour obtenir une très grande efficacité.

En l'absence de feedback, le seuil des instabilités multipaquets à chromaticité nulle est très faible : de l'ordre de 30 mA en vertical et 40 mA en horizontal. L'application du feedback permet de stabiliser dans les mêmes conditions un faisceau jusqu'à environ 500 mA. Cependant, des pertes brutales se produisent encore quelquefois à cause des ions.

Pour assurer un bon fonctionnement quelles que soient les configurations des insertions, le feedback est combiné avec une chromaticité modérée. L'architecture très puissante du FPGA permet de mesurer les mouvements de chaque paquet et de les amortir, d'exciter un seul paquet pour mesurer son nombre d'onde, et aussi d'appliquer des gains différents entre les paquets.

La performance du feedback dans le mode monopacket est remarquable : on gagne plus d'un facteur 3 sur le seuil à chromaticité nulle, et le faisceau peut être maintenu stable jusqu'à près de 20 mA avec une chromaticité modérée.

Comme prévu par les simulations, le feedback transverse est indispensable à SOLEIL pour conserver un faisceau stable de forte intensité, en maintenant des tailles transverses très proches des valeurs théoriques. Les systèmes développés ont montré leur efficacité aussi bien en mode multipaquets que monopacket.

### Les feedbacks de nombre d'onde

Maintenir constantes les dimensions transverses des faisceaux de photons délivrés à chaque ligne de lumière est un des challenges pour l'opération de l'anneau de stockage de SOLEIL. Cette action est réalisée principalement en maintenant une focalisation constante du faisceau d'électrons dans le plan horizontal (H) et vertical (V) via deux familles de quadrupôles. Cette focalisation est caractérisée par deux paramètres appelés « nombres d'onde » dont les valeurs actuelles sont

18,202 et 10,3170. Une modification de ces nombres d'onde peut aussi entraîner une réduction de la durée de vie ou de l'efficacité d'injection. Ces valeurs varient essentiellement suite à deux phénomènes. D'une part, le courant image du faisceau qui circule sur les parois des chambres à vide agit sur le faisceau d'électrons en le focalisant et induit une variation des nombres d'ondes de 0,011 (H) et -0,008 (V) pour une variation du courant stocké de 20 à 400 mA. D'autre part, chaque élément d'insertion introduit une variation des nombres d'onde (focalisation naturelle, défauts de construction) pouvant atteindre 0,007 pour l'onduleur HU640 en mode polarisation verticale, par exemple.

Depuis mars 2009, un feedback sur les nombres d'ondes a été mis en œuvre avec succès pour compenser ces effets lorsque le faisceau est délivré aux lignes de lumière. Ce système fonctionne à 0,1 Hz et stabilise les nombres d'onde à une précision de  $2 \cdot 10^{-4}$ . Il ajuste les consignes des quadrupôles de l'anneau les plus efficaces en utilisant la mesure du nombre d'onde produite par le système de feedback transverse (voir plus haut : cette mesure est faite en excitant un unique paquet d'électrons sans perturber la stabilité de position du faisceau).

Grâce à ce système, les performances de l'anneau de stockage en terme de durée de vie et d'efficacité d'injection ont été significativement améliorées et sont moins sensibles aux configurations des onduleurs pilotés librement par les utilisateurs des lignes de lumière.

Associés à un taux de disponibilité du faisceau en constante progression (plus de 96 % en 2009, et plus de 98 % de septembre 2009 à avril 2010), ces trois systèmes de feedback assurent aux scientifiques des conditions optimales pour réaliser leurs recherches sur les lignes de SOLEIL.

#### ➔ Contacts :

nicolas.hubert@synchrotron-soleil.fr  
ryutaro.nagaoka@synchrotron-soleil.fr  
laurent.nadolski@synchrotron-soleil.fr

1. FPGA : « Field Programmable Gate Array », circuit logique programmable.