

POINT FORT

Modes de remplissage de l'anneau

permettant la résolution temporelle :
mesure de la pureté des paquets
d'électrons

Quand l'anneau de stockage fonctionne en mode top-up, des électrons peuvent s'accumuler dans des paquets parasites, détériorant la pureté du faisceau d'électrons et donc la qualité des faisceaux de photons fournis aux lignes de lumière. Mais saviez-vous qu'il est possible de nettoyer un paquet d'électrons ?...

Les différents modes de remplissage de l'anneau

Dans un anneau de stockage, la tension accélératrice des cavités radiofréquence (RF) compense la perte d'énergie par rayonnement synchrotron des électrons et permet de les regrouper en paquets. Dans l'anneau de stockage de SOLEIL (circonférence 354 mètres), la période de révolution des électrons est de 1,18 μ s, soit une fréquence de rotation de 846 kHz. La fréquence RF dans les cavités accélératrices étant de 352 MHz, les électrons peuvent se regrouper en 416 paquets séparés de 2,84 ns. En fait, les paquets s'étalent longitudinalement avec une distribution approximativement gaussienne dont l'écart type (σ)

est typiquement de l'ordre de 12 ps RMS (soit une longueur à mi-hauteur de 28 ps) dans les conditions habituelles de fonctionnement (alpha nominal, tension RF de 3 MV et environ 1 mA par paquet).

Les photons émis par ces paquets d'électrons se présentent également sous forme de paquets.

Si l'on est intéressé par le flux (ou la brillance) le plus élevé possible, indépendamment de sa distribution temporelle, on privilégiera un remplissage des 416 paquets le plus uniforme possible. Dans le cas de SOLEIL, la production d'électrons par l'accélérateur linéaire (Linac) se fait alors dans le mode LPM (Long Pulse Mode) qui produit des macroimpulsions de 295 ns, correspondant à un quart de la longueur de l'anneau. On injecte ainsi dans le mode dit « 4 quarts » qui est proche d'un remplissage uniforme et permet d'atteindre une intensité maximale du faisceau stocké de 500 mA. En revanche, certains utilisateurs du rayonnement synchrotron mettent à profit la structure temporelle du rayonnement, notamment pour étudier les propriétés dynamiques des matériaux au travers d'expériences

pompe-sonde résolues en temps. À SOLEIL, c'est le cas notamment des lignes TEMPO et CRISTAL.

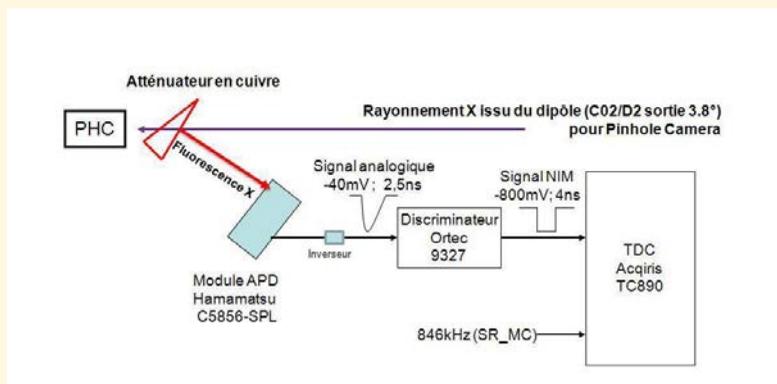
Cependant, les échelles de temps des phénomènes observés (ainsi que la réponse des détecteurs) sont rarement de l'ordre de grandeur des 2,84 ns séparant deux paquets contigus, mais plutôt de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes, d'où les modes de remplissage à 8 paquets équidistants (148 ns entre 2 paquets) et à 1 paquet (1,18 μ s entre 2 paquets).

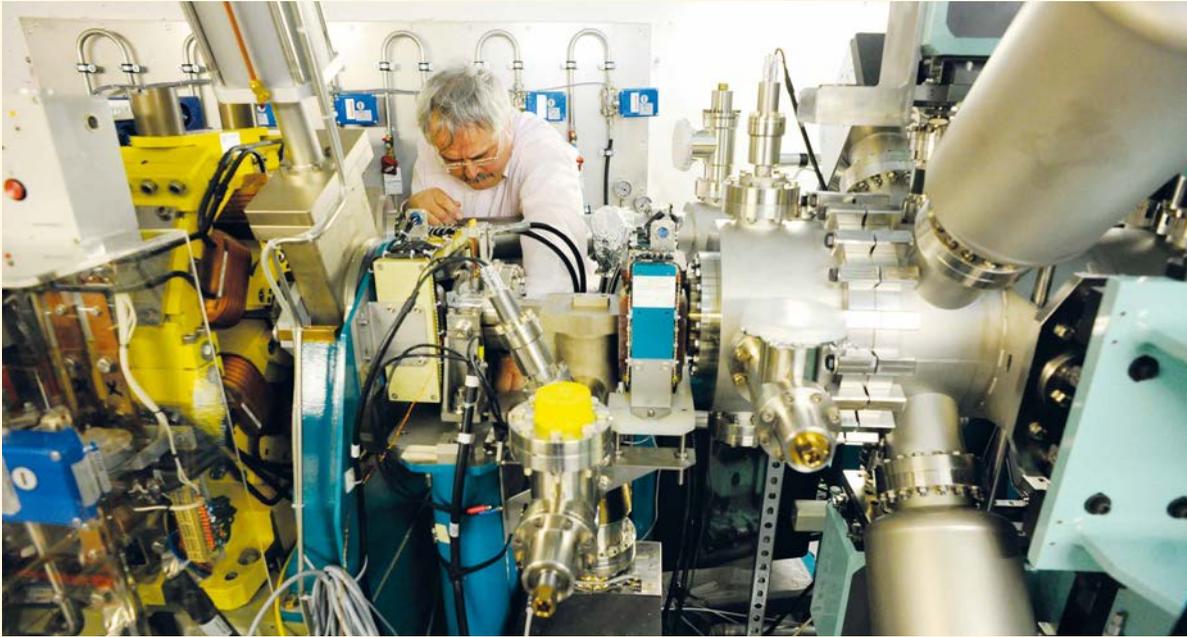
Bien que les intensités par paquets sont plus élevées que dans le mode de remplissage uniforme, l'intensité totale que l'on peut stocker dans ces modes est limitée : 120 mA (8 x 15 mA) en 8 paquets et 20 mA en 1 paquet. Ces valeurs sont imposées en partie par les effets collectifs exacerbés par la forte densité d'électrons par paquet et leur interaction avec la chambre à vide de l'anneau de stockage.

Afin de répondre simultanément aux besoins d'expériences de haut flux et de brillance et de structure temporelle, les modes de remplissage les plus utilisés de la plupart des centres de rayonnement synchrotron sont désormais des modes hybrides, où l'essentiel de l'intensité est donnée par un grand nombre de petits paquets contigus, suivi d'une fenêtre au milieu de laquelle est placé un paquet isolé (généralement de plus forte intensité).

À SOLEIL, pour la production de ces paquets isolés, le Linac travaille en mode en impulsion courte dit SPM (Single Pulse Mode) : les électrons de la cathode sont extraits par des impulsions haute tension (HT) d'environ 2 ns RMS, de façon à limiter autant que possible l'accélération d'électrons en dehors du paquet désiré. Toutefois, quelques électrons

figure 1 : Mesure de pureté du faisceau : schéma de la chaîne de mesure.





Lodovico Cassinari, responsable du groupe Diagnostics, en plein réglage dans le tunnel de l'anneau de stockage.

sont extraits de la cathode en dehors de cette plage temporelle et accélérés par le Linac, malgré divers dispositifs mis en œuvre pour limiter ce phénomène.

La pureté des paquets stockés

On définit la pureté comme le rapport entre le nombre de photons émis par les électrons indésirables présents dans un paquet supposé vide, et le nombre de photons émis par les électrons du paquet désiré (supposé isolé), ce qui ramène au rapport entre les nombres d'électrons des paquets respectifs.

L'injection se faisant par quarts (correspondants aux macroimpulsions de 295 ns), les aimants pulsés (kickers) qui permettent au faisceau incident d'être injecté dans l'anneau sont dimensionnés en conséquence : ils sont actifs pendant des durées un peu supérieures à ces 295 ns. Lors de l'injection du paquet isolé, ces mêmes aimants pulsés peuvent permettre l'injection d'électrons indésirables collectés à différents stades du processus d'accélération (courant d'« obscurité » du canon du Linac par exemple).

Les paquets parasites ainsi créés sont de très faible intensité : un électron circulant dans l'anneau correspond à un courant de 13,5 pA, à comparer au courant stocké dans les

paquets souhaités (de l'ordre de quelques milliampères).

Toutefois, en fonctionnement top-up, la durée de vie de ces paquets parasites étant nettement plus élevée que celle du paquet principal, le processus de réinjection peut amener à accumuler des électrons dans les paquets parasites, alors qu'il maintient constante l'intensité du paquet principal.

On peut alors avoir une détérioration de la pureté, qui entraîne une dégradation de la résolution du rapport

signal sur bruit des expériences conduites sur les lignes de lumière.

La mesure de pureté

Le système mis en œuvre à SOLEIL (figure 1) s'inspire de celui réalisé à l'ESRF (réf.1) ; il utilise une méthode largement répandue (réf.2) : le comptage du photon unique corrélé en temps (TCSPC : Time-correlated single photon counting).

On tire parti du rayonnement X utilisé pour la mesure de dimensions transverses du faisceau : une fenêtre

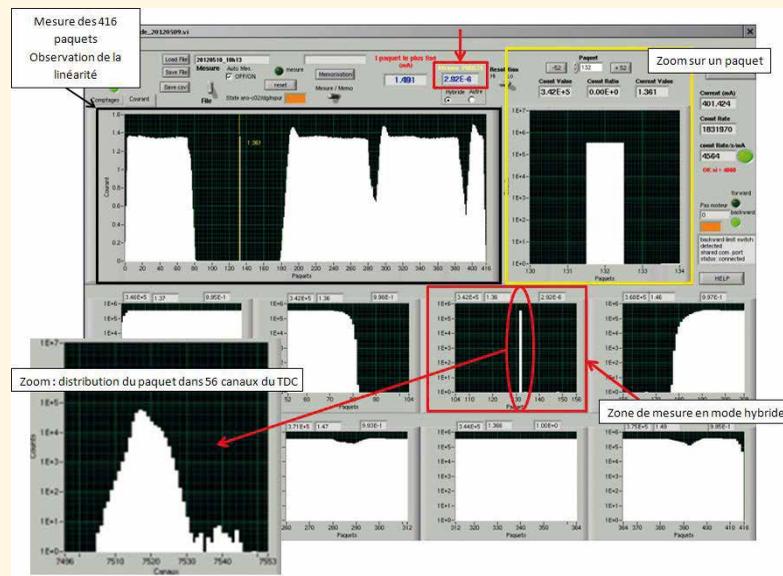


figure 2 : Écran de visualisation de la mesure de pureté du faisceau, en salle de contrôle.



Mesure de pureté du faisceau : Francis Dohou, du groupe Diagnostics, s'occupe du contrôle de l'électronique d'acquisition.

mince en aluminium (1 mm d'épaisseur) laisse passer les photons de plus haute énergie issu d'un dipôle qui sont visualisés via un dispositif optique appelé pinhole camera.

Une lame de cuivre sert d'atténuateur et est insérée entre la sortie de lumière X et le bloc pinhole.

Le rayonnement de fluorescence du cuivre est recueilli par une photodiode à avalanche (APD) protégée par une enceinte de plomb. Cet ensemble est motorisé pour amener le bloc contenant la photodiode à sa position de mesure, ou bien position de repos (protection contre une détérioration induite par le rayonnement continuellement présent dans le tunnel).

Compte tenu de la dynamique demandée au système (5 à 6 ordres de grandeur entre l'intensité du paquet principal et les paquets parasites), la diode n'est pas utilisée en mode linéaire, mais en mode stochastique (d'où l'utilisation d'une diode à avalanche).

En effet, en passant par l'intermédiaire de la fluorescence du cuivre, l'amplitude des impulsions générées par la diode à avalanche n'est plus fonction de l'intensité des paquets. En revanche, à tout moment, la probabilité pour les photons, émis par les électrons déviés par le dipôle, d'exciter un atome de cuivre capté

par la photodiode est proportionnelle au nombre de ces électrons.

Ainsi, la répartition temporelle des impulsions émises par la diode reflète la distribution temporelle des électrons qui circulent dans l'anneau.

Après traitement (discriminateur permettant d'éliminer le bruit de la diode), les impulsions sont rangées dans 23 624 canaux temporels de largeur 50 ps d'un TDC (Time-to-Digital Converter) qui couvrent ainsi les 1,18 μ s correspondant à un tour d'anneau (figure 2).

Les 50 ps de résolution du TDC ne permettent pas de donner une bonne représentation de la distribution au sein d'un paquet (de l'ordre de 20 ps RMS) ; en revanche, cette résolution suffit à distinguer 2 paquets consécutifs (séparés de 2,84 ns).

Pour obtenir la résolution demandée pour la mesure de la pureté (10^{-6} , c'est-à-dire un facteur un million entre l'intensité du paquet principal et du paquet résiduel), les impulsions sont accumulées jusqu'à avoir un million de coups dans le paquet principal. Avec 4 000 coups/ mA/s, et 5 mA pour le paquet principal en mode hybride, la mesure prend 50 secondes.

Typiquement, la pureté atteinte lors d'un remplissage de l'anneau en mode hybride (de 0 à 430 mA) est de

l'ordre de quelques 10^{-6} pour les paquets supposés vides, à l'exception du paquet qui suit immédiatement le paquet isolé qui est généralement de l'ordre de 10^{-5} . Toutefois, un mauvais réglage des paramètres d'injection (notamment au niveau du déphasage de l'impulsion du Linac ou des aimants pulsés) peut amener à des valeurs plus élevées. De plus, la situation ne peut que se détériorer au fur et à mesure des injections successives en mode top-up (cf ci-dessus) : il n'est pas rare d'atteindre une pureté de quelques 10^{-4} après quelques jours de faisceau ininterrompu. Cette valeur est conforme à la demande actuelle des lignes de lumière.

Nettoyeur de paquet

En revanche, on n'est pas à l'abri d'un incident qui conduirait par exemple à injecter inopinément dans le quart vide.

Il est donc utile d'être en mesure de nettoyer le faisceau stocké en supprimant les paquets indésirables. Ceci suppose d'être en mesure d'exciter suffisamment les paquets en question pour les amener à se perdre, sans affecter les autres paquets.

Ceci est réalisé à l'aide du feedback transverse (FBT) qui a pour fonction de contrer les oscillations transverses individuelles des paquets du faisceau, oscillations induites par l'interaction de chaque paquet avec son environnement (autres paquets, chambre à vide, ions, etc.).

Le FBT utilisé à SOLEIL a une résolution suffisante pour qu'on puisse inverser sa polarité pour un paquet déterminé (anti-feedback) : on parvient ainsi à exciter de manière résonnante le paquet en question, tout en gardant la fonction feedback sur les autres paquets.

Les développements sont actuellement en cours pour implémenter cette fonction « nettoyeur de paquets » pour l'utilisation en opération.

→ Contact :

Lodovico.cassinari@synchrotron-soleil.fr

Références :

[1] B. Joly, G.A. Naylor "A High Dynamic Range Bunch Purity Tool", DIPAC 2001 - ESRF, Grenoble, France.

[2] S. Takano "Beam Diagnostics with Synchrotron Radiation in Light Sources", IPAC, 10, Kyoto, Japon.