

Instabilité micro-onde dans les paquets d'électrons relativistes sur anneaux de stockage

Clément Evain, Joanna Barros, Alexandre Louergue, Marie-Agnès Tordeux, Ryutaro Nagaoka, Marie Labat, Lodovico Cassinari, Gaëlle Creff, Laurent Manceron, Jean-Blaise Brubach, Pascale Roy, & Marie-Emmanuelle Couprie

Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91 192 Gif-sur-Yvette, France
 clement.evain@synchrotron-soleil.fr

Résumé. Dans les centres de rayonnement synchrotron, l'interaction d'un paquet d'électrons avec le rayonnement qu'il émet entraîne des comportements dynamiques complexes. En particulier, des instabilités spatio-temporelles apparaissent typiquement lorsque la charge dépasse une valeur seuil, ce qui représente une limitation fondamentale pour certains modes d'utilisation des anneaux de stockage. En parallèle ces effets sont également étudiés car ils permettent d'obtenir une émission de rayonnement cohérent TéraHertz. Des expériences menées à SOLEIL, en combinaison avec des simulations numériques, montrent que cette instabilité, appelée instabilité micro-onde, est due à la formation par intermittence de micro-structures dans les paquets d'électrons. Ces travaux indiquent une dynamique riche, faisant intervenir des processus d'amplification de structures, d'amortissement et de diffusion.

Abstract. In synchrotron radiation centers, interaction between an electron bunch with its emitted radiation leads to complex behaviour. In particular, spatio-temporal instabilities arise when the bunch charge exceed a threshold value, limiting some operation of the storage ring. Besides, these effects are studied as they permit to produce a strong coherent synchrotron radiation in the Terahertz range. Experiments at SOLEIL, in association with numerical simulations show that the so-called microbunching instability is due to irregular apparition of micro-structures in the electron bunch. These works point out a rich dynamics including structure amplification, damping and diffusion.

1 Introduction

Dans les anneaux de stockage (Fig. 1), des paquets formés de milliards d'électrons circulent à une vitesse relativiste pour produire un rayonnement synchrotron, utilisé par les lignes de lumière pour sonder la matière. Ce rayonnement est émis lorsque les électrons sont accélérés, principalement dans des aimants de courbure et dans des onduleurs (composés d'une alternance d'aimants nord/sud créant un champ magnétique périodique permanent, faisant prendre aux électrons une trajectoire sinusoïdale). Les centres de rayonnement de troisième génération comme SOLEIL sont caractérisés par des paquets de faibles dimensions et divergences transverses. Longitudinalement, le rayonnement est ordinairement incohérent puisque les émissions provenant des différents électrons d'un même paquet ne sont généralement pas en phase. Toutefois, il est possible d'obtenir un rayonnement cohérent dans le domaine TéraHertz en raccourcissant la longueur du paquet (typiquement jusqu'à 1 ps, contre la dizaine de ps en mode normal) en utilisant un mode de réglage particulier des champs magnétiques de l'anneau, appelé mode de « faible facteur de compression des moments » (ou mode *low- α* , α désignant le facteur de compression des moments). Dans ce mode, le rayonnement peut être émis de manière cohérente dans le domaine du TéraHertz puisque les longueurs d'onde associées sont plus longues que la taille du paquet, permettant de gagner plusieurs ordres de grandeur en puissance par rapport au rayonnement incohérent, rendant ce type de source très recherché [1,2]. Néanmoins, lorsque le nombre d'électrons dans un paquet dépasse une valeur seuil, une instabilité apparaît, rendant le rayonnement THz cohérent trop instable pour être utilisé [3]. Cette instabilité appelée instabilité micro-onde est observée depuis plusieurs années dans les anneaux de stockage [1,3,4,5]. Dans cet article, nous présentons les études faites au synchrotron SOLEIL sur cette instabilité.

Après une brève introduction du synchrotron SOLEIL, nous montrerons les caractéristiques du signal THz émis en dessous et au dessus du seuil d'instabilité, le rayonnement THz étant le principal diagnostic de l'instabilité micro-onde. Grâce à des simulations numériques, comparées aux données expérimentales, nous pourrions comprendre la formation et l'évolution de structures dans le paquet d'électrons.

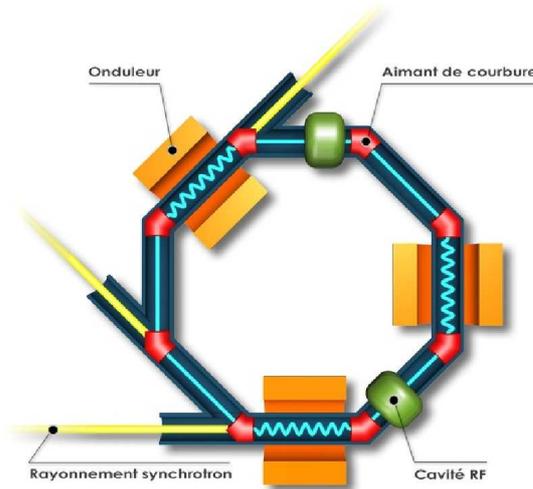


FIG. 1. Après leur accélération dans un accélérateur linéaire puis dans un « booster » (non affiché), les électrons ayant acquis leur énergie nominale circulent dans l'anneau de stockage. Ils sont déviés de leur trajectoire rectiligne par des aimants de courbure. Le rayonnement synchrotron est émis lorsque les électrons sont déviés, principalement dans les aimants de courbures et dans les ondulateurs. À chaque tour d'anneau, les électrons sont accélérés par les cavités RF pour compenser l'énergie perdue par émission du rayonnement.

2 Présentation du synchrotron SOLEIL

Le synchrotron SOLEIL, situé à Saint-Aubin près de Paris, fonctionne depuis 2006. Les électrons circulant dans l'anneau fournissent actuellement un rayonnement pour 24 lignes dont 8 sur aimants de courbures (dont la ligne TéraHertz/infrarouge AILES) et 16 sur ondulateurs, couvrant un domaine spectral s'étendant du TéraHertz aux rayons X-durs [6]. Le mode classique d'utilisation est un remplissage de l'anneau avec 416 paquets, totalisant une charge de 400 mA (500 mA après la validation des tests de radio-protection). En 2010, 4905 heures ont été réservées pour fournir du rayonnement aux lignes de lumière et 1200 heures pour l'étude et la modification du synchrotron. Le tableau ci-dessous donne quelques paramètres du synchrotron SOLEIL.

TAB.1. Paramètres du synchrotron SOLEIL.

Circonférence (m)	354
Énergie nominale E_0 (GeV)	2.75
Dimension transverse du paquet (en sections droites moyennes) σ_x (μm), σ_y (μm)	182, 8.11
Rayon R (m) et longueur L (m) des aimants de courbure	5.39, 1.05
Facteur de compression des moments nominal α_0	$4.3 \cdot 10^{-4}$
Longueur RMS des paquets en mode α_0 (ps)	13.8

3 Signal TéraHertz proche du seuil de l'instabilité micro-onde

Le rayonnement THz est le principal diagnostic de l'instabilité micro-onde, puisque lorsque qu'une structure apparaît dans le profil longitudinal du paquet, un rayonnement cohérent intense est émis. Le rayonnement THz a été enregistré sur la ligne TéraHertz/infrarouge AILES, utilisant un rayonnement synchrotron émis au niveau d'un aimant de courbure. En sortie de la ligne, au niveau de la station expérimentale, le signal THz est divisé en deux parties (Fig. 2) par une séparatrice de Mylar de 6 μm . La première partie est directement enregistrée par un bolomètre InSb refroidi à 4,2 K de résolution temporelle allant jusqu'à la microseconde (IR Labs), permettant de connaître l'évolution temporelle du signal THz. La seconde partie passe à travers un interféromètre de Michelson (Bruker IFS 125) avant d'être enregistrée par un autre bolomètre refroidi à 4,2 K, fournissant les informations spectrales.

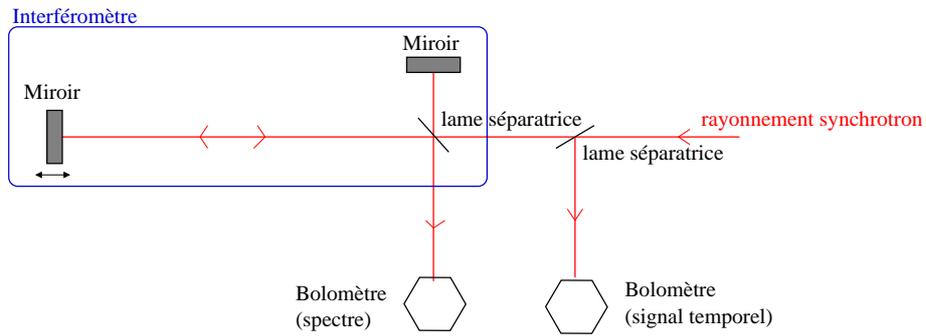


FIG. 2. Schéma du dispositif expérimental de la ligne de lumière THz/IR AILES. Le signal provenant de l'émission des électrons au niveau d'un aimant de courbure est séparé en deux par une lame séparatrice. La première partie du signal est directement enregistrée par un bolomètre et la deuxième passe par un interféromètre avant d'être enregistrée par un deuxième bolomètre.

La figure 3 présente l'évolution temporelle et spectrale typique du rayonnement THz lorsque le nombre d'électrons (ou le courant I , proportionnel au nombre d'électrons) dans un paquet est augmenté. Les expériences ont été effectuées avec un seul paquet dans l'anneau en mode $\alpha_0/10$. Pour un courant suffisamment faible ($I = 0.15$ mA), le signal temporel THz est stable (Fig. 3a) et le signal observé sur le spectre est très faible, signature d'un rayonnement incohérent (Fig. 3d). Pour un courant plus élevé ($I = 0.20$ mA), le signal temporel THz reste relativement stable (Fig. 3b), et l'augmentation de certaines composantes spectrales indique qu'une partie du rayonnement est cohérent (Fig. 3d). Enfin, pour un courant légèrement plus élevé ($I = 0.35$ mA), le signal temporel devient fort instable (Fig. 3c) et le spectre associé très bruyant (Fig. 3d).

4 Observation des micro-structures

Le rayonnement THz cohérent est un diagnostic important pour comprendre ces instabilités puisqu'il indique la présence de modulation dans le paquet d'électrons. Toutefois une observation directe des électrons n'est pas possible expérimentalement. Pour comprendre plus précisément le comportement des électrons lors de l'instabilité, nous avons réalisé des simulations numériques.

La dynamique des électrons est décrite par un code dit "macro-particulaires". Chaque macro-particule représente plusieurs électrons. Le type de dynamique étudié est bien décrit par la dynamique longitudinale [7], et chaque macro-particule est définie par deux coordonnées : sa position longitudinale z et son énergie associée p . La position (z,p) de chaque macro-particule est calculée à chaque tour d'anneau. À chaque tour, une macro-particule perd de l'énergie puisqu'elle a émis un rayonnement synchrotron. Ce rayonnement est émis de manière stochastique du fait des propriétés quantiques d'émission, ce qui induit

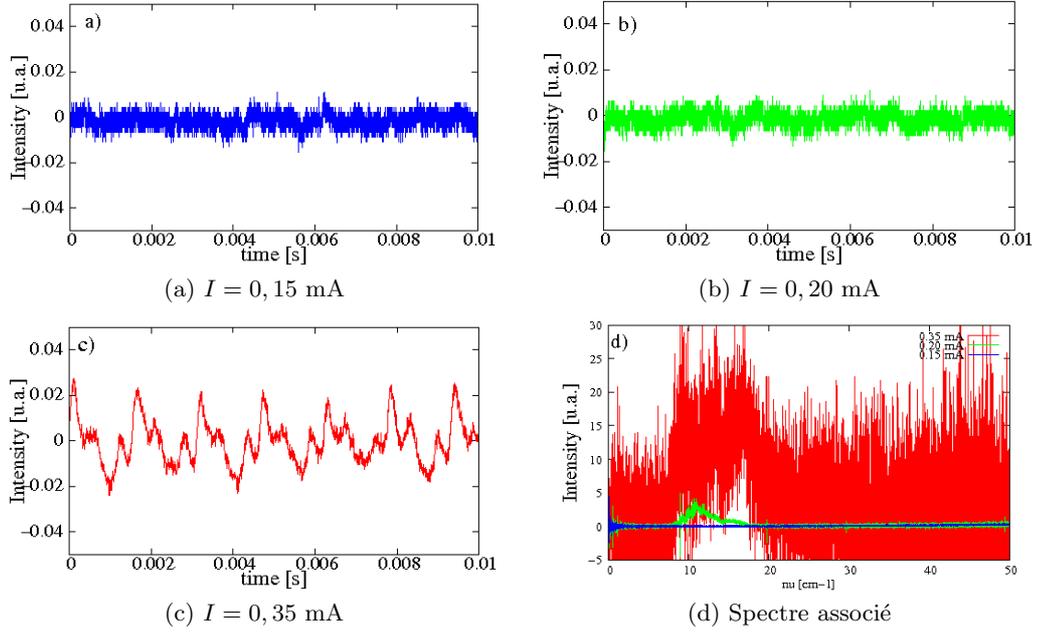


FIG. 3. Signal THz enregistré en mode *low-alpha* ($\alpha = \alpha_0/10$ avec α_0 le facteur de compression des moments nominal). Séries temporelles pour différents courants (a-c) et spectre associé (d) avec une résolution de $0,004 \text{ cm}^{-1}$.

de la diffusion en énergie, qui atténue les structures qui peuvent se former dans le paquet. À chaque tour, la macro-particule est aussi accélérée lors de son passage dans les cavités RF, pour compenser les pertes d'énergies dues au rayonnement. La position longitudinale d'une macroparticule change aussi en fonction de son énergie, puisque le rayon de courbure de la trajectoire des électrons dans l'anneau dépend de l'énergie des électrons. En ne prenant en compte que ces éléments, la dynamique du paquet des électrons est toujours stable et le paquet d'électrons composé de l'ensemble des macro-particules a une forme gaussienne dans les deux directions de l'espace des phases (z, p).

L'élément qui déclenche l'instabilité provient d'effets collectifs, en particulier de l'interaction des électrons avec leur propre rayonnement. Par exemple dans un aimant de courbure, où l'émission par un électron situé à l'arrière du paquet peut interagir avec un électron situé à l'avant du paquet (Fig. 4). L'interaction entre le rayonnement synchrotron et les électrons dans un aimants de courbure a été calculée d'après [8].

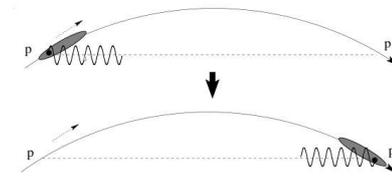


FIG. 4. Schéma de l'interaction du paquet d'électrons avec le rayonnement qu'il émet dans un aimant de courbure. Les électrons de l'arrière du paquet agissent sur ceux du début. D'après [9].

Les simulations numériques montrent que durant l'émission de bouffées de rayonnement THz cohérent, il se forme et se propage dans le profil longitudinal $\rho(z)$ du paquet d'électrons une structure (Fig. 5a). Un point intéressant est qu'une signature de l'évolution de ces structures se retrouve dans le rayonnement THz cohérent (Fig. 5b), et permet de comparer les résultats numériques aux résultats expérimentaux (Fig. 5c). Cette signature est une composante fréquentielle du signal THz cohérent, que l'on retrouve à

la fois numériquement et expérimentalement, avec toutefois des fréquences un peu différentes : autour de 20 kHz dans les simulations numériques contre 35 kHz expérimentalement. Le signal THz évolue aussi à une échelle plus lente, sous forme de bouffées (*bursts*) dont la période caractéristique est de l'ordre de la milliseconde (Figs 5b et 5c) [3,4,7].

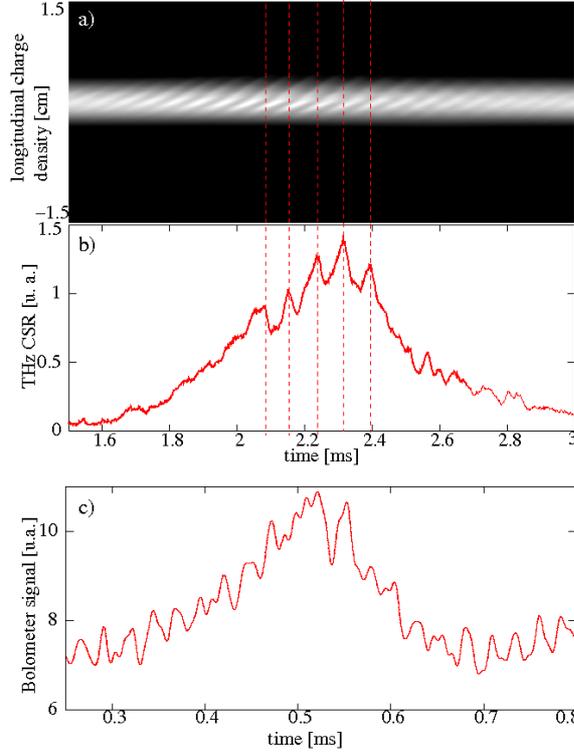


FIG. 5. a) Profil longitudinal de charge $\rho(z)$ du paquet d'électrons en fonction du temps en mode $\alpha_0/10$ avec un courant de 0.55 mA. b) Signal THz cohérent associé entre 5 cm^{-1} et 80 cm^{-1} . Durant une bouffée de rayonnement cohérent des structures se forment dans le profil longitudinal du paquet d'électrons. Une signature de la formation de ces structures se retrouve dans le signal THz cohérent émis, sous la forme d'une modulation à une fréquence autour de la dizaine de kHz. c) Signal THz expérimental en mode $\alpha_0/10$ avec un courant de 0.3 mA. On observe aussi une modulation du signal THz. Les fréquences supérieures à 100 kHz du signal THz expérimental ont été filtrées.

Finalement, nous avons cherché à observer expérimentalement l'apparition de cette fréquence autour de 35 kHz, signature de structures dans le paquet d'électrons. L'augmentation progressive du nombre d'électrons dans le paquet conduit à l'apparition de ces structures. Pour un courant $I < 1.4 \text{ mA}$, il n'y a pas de composante significative du signal THz à une fréquence autour de 35 kHz (Fig. 6a). Par contre, une telle fréquence apparaît pour un courant $I > 2.27 \text{ mA}$ (Fig. 6b). À l'apparition des micro-structures, le signal THz n'a quasiment pas de composante à basse fréquences, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de bouffées de rayonnement cohérent (Figs 5b et 5c), dont les fréquences caractéristiques sont de l'ordre de la milliseconde. Les micro-structures apparaissent donc avant les bouffées et sont à l'origine de celles-ci.

5 Conclusion

Dans un anneau de stockage, l'interaction d'un paquet d'électrons avec le rayonnement qu'il émet entraîne une instabilité lorsque le nombre d'électrons dans le paquet dépasse une valeur critique. Le principal diagnostic de l'instabilité est un rayonnement TéraHertz cohérent instable, caractéristique de

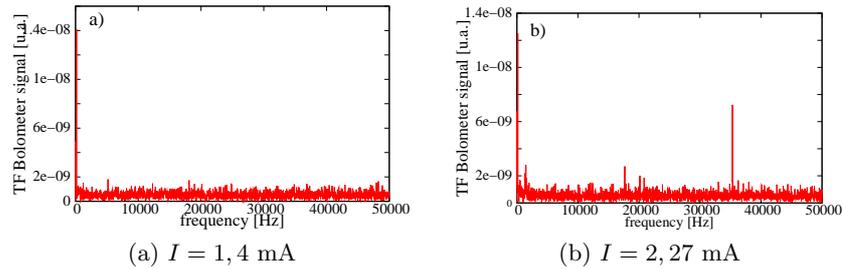


FIG. 6. Norme de la transformée de Fourier du signal expérimental THz, enregistré avec un courant de 1,4 mA (a) et 2,27 mA (b) en mode low- α ($\alpha = \alpha_0/10$).

la présence de modulation dans le paquet d'électrons. L'espace des phases du paquet d'électrons n'étant pas directement observable expérimentalement, des simulations numériques permettent d'observer que lors de l'instabilité, appelée instabilité micro-onde, il se forme et se propage une structure dans le profil longitudinal de charge du paquet d'électrons. Le comportement observé sur les simulations numériques est confirmé par une signature dans le signal THz cohérent, que l'on retrouve sur les résultats numériques et expérimentaux, et qui consiste en la présence d'une fréquence autour de la dizaine de kHz. La mise en évidence de cette fréquence nous a permis de connaître le seuil d'apparition des instabilités qui est lié à l'apparition de cette fréquence. Ces observations seront utiles pour modéliser finement l'interaction électrons/rayonnement synchrotron et tenter de contrôler cette instabilité.

Nous remercions S. Bielawski et C. Szwarz pour les fructueuses discussions. Nous remercions aussi l'ANR DYNACO.

Références

1. M. ABO-BAKR, J. FEIKES, K. HOLLDAK, G. WÜSTEFELD & H.-W. HÜBERS, Steady-State Far-Infrared Coherent Synchrotron Radiation detected at BESSY II, *Physics Review Letters*, **88**, 254801 (2002).
2. F. SANNIBALE, J. M. BYRD, Á. LOFTSDÓTTIR & M. VENTURINI, A model describing stable coherent synchrotron radiation in storage rings, *Physics Review Letters*, **93**, 094801 (2004).
3. J. M. BYRD, W. P. LEEMANS, A. LOFTSDOTTIR, B. MARCELIS, M. C. MARTIN, W. R. MCKINNEY, F. SANNIBALE, T. SCARVIE & C. STEIER, Observation of broadband self-amplified spontaneous coherent Terahertz synchrotron radiation in a storage ring, *Physics Review Letters*, **89**, 224801 (2002).
4. G. L. CARR, S. L. KRAMER, J. B. MURPHY, R. P. S. M. LOBOB & D. B. TANNER, Observation of coherent synchrotron radiation from the NSLS VUV ring, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, **463**, 387-392 (2001).
5. U. ARP, G. T. FRASER, A. R. HIGHT WALKER & T. B. LUCATORTO, Spontaneous coherent microwave emission and the sawtooth instability in a compact storage ring, *Physical Review Special Topics — Accelerators & Beams*, **4**, 054401 (2001).
6. J.M. FILHOL, A. NADJI, J. C. BESSON, P. BRUNELLE, M. E. COUPRIE, J. C. DENARD, C. HERBEAUX, J. F. LAMARRE, P. LEBASQUE, M. P. LEVEL, P. MARCHAND & R. NAGAOKA, Operation and performance upgrade of the SOLEIL storage ring, *Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference*, (Kyoto, Japan), pp. 2493-2495 (2010).
7. M. VENTURINI & R. WARNOCK, Bursts of coherent synchrotron radiation in electron storage rings : A dynamical model, *Physical Review Letters*, **89**, 224802 (2002).
8. J. B. MURPHY, S. KRINSKY & S. R. GLUCKSTERN, Longitudinal wakefield for an electron moving on a circular orbit, *Particle Accelerators*, **57**, 9 (1997).
9. T. AGOH, *Dynamics of coherent synchrotron radiation by paraxial approximation*, Ph'D Thesis, Université de Tokyo (2004).