

Une application récente et surprenante de l'effet de *plasma wave echo* : la génération de rayonnement X cohérent

C. Evain^{1,2}, M. Labat¹, A. Loulergue¹, M.-E. Couprie¹, A. Nadji¹, C. Sz waj², & S. Bielawski²

¹ Synchrotron SOLEIL, Saint Aubin, BP 34, 91 192 Gif-sur-Yvette, France

² PhLAM, Bat. P5, Université Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

`clement.evain@phlam.univ-lille1.fr`

Résumé. L'écho d'ondes de plasma (plasma wave echo) est un effet dynamique connu depuis les années 60 [1], et qui peut être interprété comme un effet de « mémoire » à long terme. Dans un premier temps, on effectue une première modulation, induisant une modulation dans l'espace des phases (par exemple un feuilletage), mais qui est « caché », c'est-à-dire sans conséquences visible en pratique. Ensuite, l'existence de cette structure est révélée lorsqu'une deuxième modulation est appliquée au système. Cet effet a été observé dans des domaines variés comme les plasmas [2], l'hydrodynamique [3], l'équation de Kuramoto [6], les gaz classiques [4], les atomes froids [5]. Bien qu'ayant connu un intérêt fondamental certain, les applications de cet effet ont été relativement limitées. En 2009, cet effet a connu une application potentielle inattendue, dans le domaine de la génération de rayonnement X cohérent. Le fluide en question est un paquet d'électrons relativistes dont l'espace des phases est manipulé par des lasers externes. L'application du phénomène de « plasma wave echo » à ce fluide particulier est actuellement considéré comme une voie potentiellement révolutionnaire pour la production de rayonnement laser VUV et X [7]. Nous présentons ici un ensemble de résultats numériques quantitatifs, démontrant la possibilité d'appliquer cet effet dans les anneaux de stockage déjà existants [8]. Ensuite, nous présentons le design de LUNEX 5, un projet de démonstrateur français dont l'un des objectifs principaux est l'étude de la production de rayonnement X par cet effet [9].

Abstract. Plasma wave echo is a dynamical effect, well known since the 60's [1], which can be interpreted as a long term "memory" process. As a first step, a first modulation is made, inducing a modulation in the phase-space (for example a flakiness), but which remains "hidden" (i.e. without any visible consequence). Then, the existence of this structure is revealed thanks to a second modulation applied to the system. This effect was observed in several domains, for example in plasma physics [2], hydrodynamics [3], Kuramoto equation [6], classical gaz [4], cold atoms [5]. Although its fundamental interest is recognized, applications of this effect were still limited. In 2009, this effect knew an unexpected potential application, in the domain of X-ray coherent radiation. The considered fluid is a relativistic electron bunch, whose phase-space is manipulated by external lasers. Application of this plasma wave echo process to this special fluid is at present considered as a potentially revolutionary way to generate laser radiation in the VUV and X [7]. We present here quantitative numerical results, showing the possibility to apply this effect to storage ring already built [8]. Then, we present the design of LUNEX 5, a French facility demonstrator, whose one of the main objectives is the study of X-ray generation with this effect [9].

1 Introduction : processus d'écho dans les paquets d'électrons relativistes

Le schéma d'écho dans les paquets d'électrons relativistes, ou EEHG (*Echo-Enabled Harmonic Generation*) [7,10], est basé sur la modification de l'espace des phases de paquet d'électrons grâce à des lasers externes et à des zones dispersives. Ce schéma comporte 4 étapes. La première étape consiste à moduler l'énergie des électrons (Fig. 1a), en faisant interagir les électrons avec une impulsion laser externe. L'énergie des électrons est modulée à la fréquence de l'onde optique. Pour que l'échange d'énergie entre les électrons et l'onde optique soit efficace, l'interaction a lieu dans une zone de champ magnétique périodique (formée par une succession d'aimants constituant un système appelé onduleur). Ensuite, ce paquet d'électrons traverse une zone dispersive qui a pour effet de modifier la position des électrons en fonction de leur énergie, et donne un aspect feuilleté à l'espace des phases (Fig. 1b). Dans ce type d'expérience, la quantité "détectable" du paquet d'électrons est sa densité longitudinale de charge, c'est à

dire la projection de l'espace des phases selon l'axe vertical. À cet étape du processus, les transformations appliquées au paquet d'électrons ne sont pas détectables (Fig. 1b). Ensuite, le paquet d'électrons est re-soumis à une interaction avec une seconde impulsion laser, qui vient re-moduler l'énergie des électrons à la longueur d'onde optique (Fig. 1c). Finalement, ce paquet traverse une seconde zone de dispersion (beaucoup plus faible que la première) qui vient "redresser" verticalement la structure de l'espace des phases (Fig. 1d), et faire apparaître dans le profil du paquet d'électrons une modulation fine (Fig. 1d).

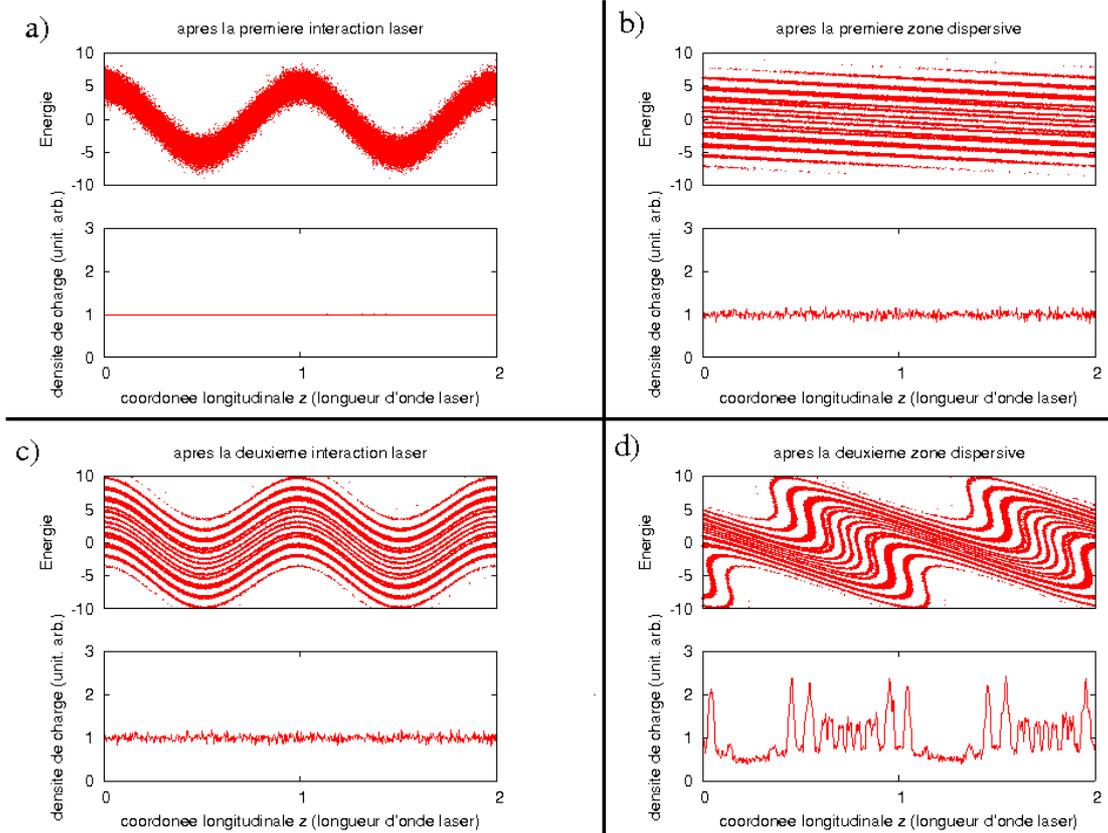


Figure 1. Espace des phases longitudinal (position/énergie) et densité de charge du paquet d'électrons aux différentes étapes du processus d'écho. a) après la première interaction laser/électrons, b) après la première zone dispersive, c) après la deuxième interaction laser/électrons, d) après la seconde zone dispersive. À la fin du processus, la densité de charge du paquet d'électrons est modulée à une fréquence multiple de la fréquence des lasers externes (ici l'harmonique 12).

L'attrait de cette méthode réside dans le fait que les structures dans la densité de charge peuvent être très courtes. En effet, la modulation apparaît à des harmoniques de la fréquence laser, et "l'amplitude" des micro-structures diminue en $n^{-1/3}$ (n le numéro d'harmonique) [7,10]. En théorie, cela permet d'atteindre des numéros d'harmoniques de l'ordre de la centaine (à comparer aux méthodes jusque là existantes, permettant d'atteindre des numéros d'harmonique de l'ordre de la dizaine). Une fois créées, ces micro-structures peuvent être utilisées pour démarrer la dynamique d'amplification des lasers à électrons libres et obtenir un rayonnement totalement cohérent à la longueur d'onde des micro-structures. Nous montrons aussi qu'il est possible d'appliquer ce processus aux anneaux de stockage, et la réalisation expérimentale de ce schéma permettrait d'obtenir un rayonnement femtoseconde cohérent dans le VUV et X (section 2). Ce processus d'EEHG a été démontré expérimentalement sur deux lasers à électrons

libres (aux USA [11] et en Chine [12]). Néanmoins les numéros d'harmonique pour l'instant obtenus restent faibles (< 10) par rapport au potentiel de cette méthode. Tester ce schéma à des harmoniques élevées et produire un rayonnement laser X est un des objectifs principaux du projet de Laser à Électron Libres français LUNEX5 (section 3).

2 Rayonnement cohérent femtoseconde sur anneau de stockage par processus d'Echo

Le rayonnement sur anneaux de stockage est généralement émis sous forme d'impulsions d'une durée relativement courte (30 ps RMS typiquement, liée à la longueur du paquet). Néanmoins, il y a une forte demande des utilisateurs de rayonnement synchrotron pour produire un rayonnement encore plus court, de l'ordre de la dizaine ou centaine de femtosecondes. Il existe une technique, appelée *slicing*, utilisée pour ne prélever qu'une partie du rayonnement des électrons grâce à une interaction laser/électrons [13,14]. La durée des impulsions avec cette technique est de l'ordre de la durée des impulsions lasers, c'est à dire typiquement de 100 fs. Cependant avec cette technique, diminuer la longueur des impulsions se fait au détriment du flux de photons, puisque seulement une faible partie du rayonnement des électrons est utilisée. Appliquer le principe d'écho sur anneau permet d'obtenir un rayonnement femtoseconde, avec en théorie un flux de photons beaucoup plus important [8]. La composition du rayonnement synchrotron avec le processus d'écho est illustré Fig. 2. Habituellement, le rayonnement synchrotron est incohérent longitudinalement puisqu'il n'y a pas de relation de phase entre les électrons. Créer des micro-structures dans le profil longitudinal du paquet permet aux électrons d'émettre un rayonnement cohérent (en phase) à la longueur d'onde des micro-structures. Comme les micro-structures existent le long de l'intervalle de recouvrement des deux impulsions lasers, l'impulsion cohérente a une durée de l'ordre de la durée des impulsions lasers, typiquement 100 fs. Si l'amplitude de la modulation des micro-structures est suffisamment importante, la puissance du rayonnement cohérent est supérieure de plusieurs ordres de grandeurs par rapport à la puissance du rayonnement incohérent. Le signal utilisable est donc l'impulsion cohérente femtoseconde et l'impulsion incohérente picoseconde est considérée comme du bruit.

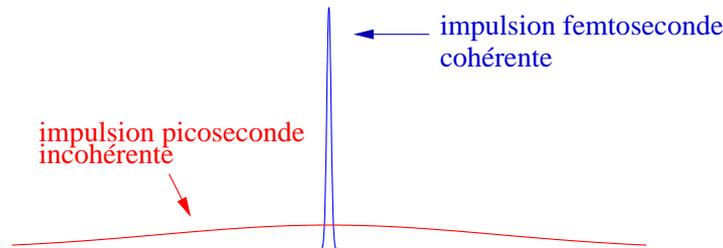


Figure 2. Représentation schématique du rayonnement synchrotron d'un paquet d'électrons dont une zone de sa densité de charge est micro-structurée.

Nous avons appliquée cette idée au cas concret du synchrotron SOLEIL (Fig. 3) [8]. Les lasers externes considérés dans l'étude sont des lasers Saphir :Titane (800 nm). En simulant la dynamique des électrons dans l'anneau de stockage avec un code de macro-particules et en ajustant finement les champs des éléments magnétiques de l'anneau, nous pouvons obtenir une modulation significative de la densité de charge des paquets d'électrons jusqu'à l'harmonique 150, correspondant à une longueur d'onde proche de 5 nm.

La puissance du rayonnement cohérent émis a été estimée à l'harmonique 30 (i.e. à 26 nm) avec une expression analytique et avec le code numérique GENESIS [15]. Avec des paramètres réalistes de SOLEIL, la puissance crête du rayonnement cohérent est proche de 100 kW, soit un million de fois supérieure par rapport à celle obtenue avec la technique de *slicing*. La durée de l'impulsion cohérente est de 100 fs FWHM. L'énergie par impulsion est proche 10 nJ. Le rapport signal sur bruit, c'est à dire le ratio entre

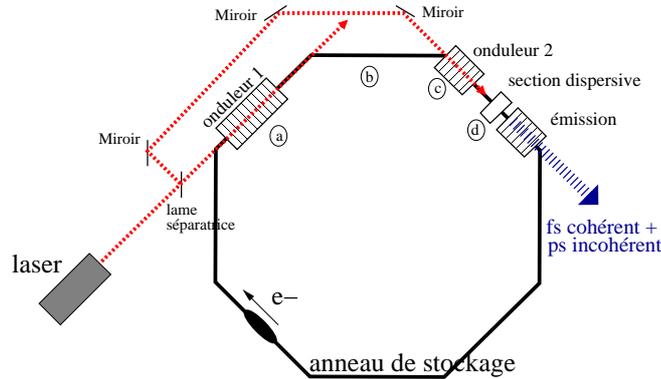


Figure 3. Schéma de l'application du processus d'écho sur anneau de stockage. Un paquet d'électrons circulant à une vitesse relativiste dans un anneau de stockage est soumis à une première interaction avec un laser externe dans un ondulateur (a). Ce paquet d'électrons traverse ensuite une section de l'anneau de stockage dispersive (b). Ensuite, le paquet d'électrons est re-soumis à une interaction avec une seconde impulsion laser externe (c), puis passe dans une zone de faible dispersion (d), faisant apparaître les micro-structures dans le profil longitudinal du paquet d'électrons. Lorsque ce paquet rayonne dans un ondulateur accordé à la longueur d'onde des micro-structures, une partie du rayonnement est cohérent.

l'énergie de l'impulsion cohérente femtoseconde et l'énergie de l'impulsion picoseconde incohérente est proche de 100.

3 LUNEX5 : projet français de laser à électrons libres

L'un des objectifs du projet de laser à électrons libres LUNEX5 est de produire un rayonnement cohérent femtoseconde en utilisant le processus d'écho [9]. Le synoptique de LUNEX5 est représenté Fig 4. Pour le processus d'écho, un paquet d'électrons est accéléré jusqu'à une énergie de 400 MeV, puis il est soumis à deux interactions avec des impulsions laser (à 266 nm, la troisième harmonique de 800 nm) et traverse deux zones dispersives (créée par des dipôles). Une fois les micro-structures créées, le paquet d'électrons rayonne dans un ondulateur accordé à la longueur d'onde des micro-structures.

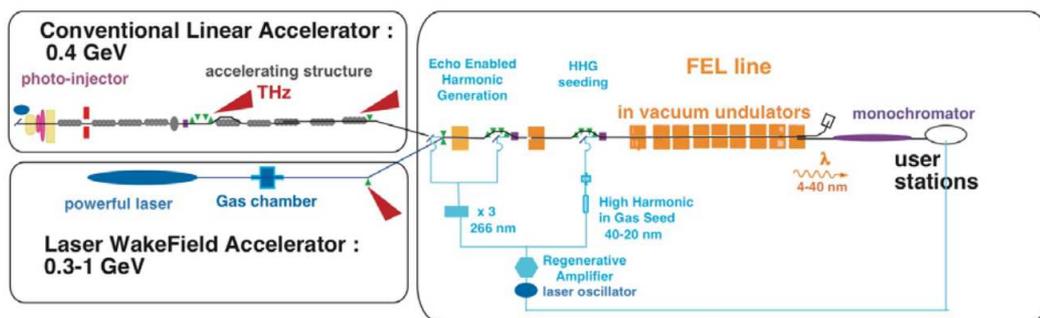


Figure 4. Synoptique du projet LUNEX5. Ce projet comporte deux types d'accélération, une accélération conventionnelle (par cavité radio-fréquence) et une accélération par plasma (*Laser WakeField Accelerator*). Pour créer les micro-structures par processus d'écho, le paquet d'électrons est soumis à deux interactions avec une impulsion laser externe (à 266 nm) et à deux zones dispersives (formées par des dipôles). Le processus d'amplification des micro-structures a ensuite lieu dans un long ondulateur, accordé à la longueur d'onde des micro-structures.

Les performances ont été obtenues avec le code GENESIS [15], simulant la dynamique des électrons, le rayonnement qu'ils émettent et l'interaction entre le paquet et son rayonnement. Les caractéristiques

du rayonnement émis à 12 nm (harmonique 22 du 266 nm) sont présentées en figure 5. La durée de l'impulsion est de 7 fs FWHM, sa puissance crête de 30 MW. L'énergie par impulsion est de 0.2 μJ , correspondant à $1.3 \cdot 10^{10}$ photons par impulsion. La largeur spectrale relative est de $8 \cdot 10^{-4}$. La largeur transverse RMS est de 60 μm et la divergence du faisceau de 50 μrad .

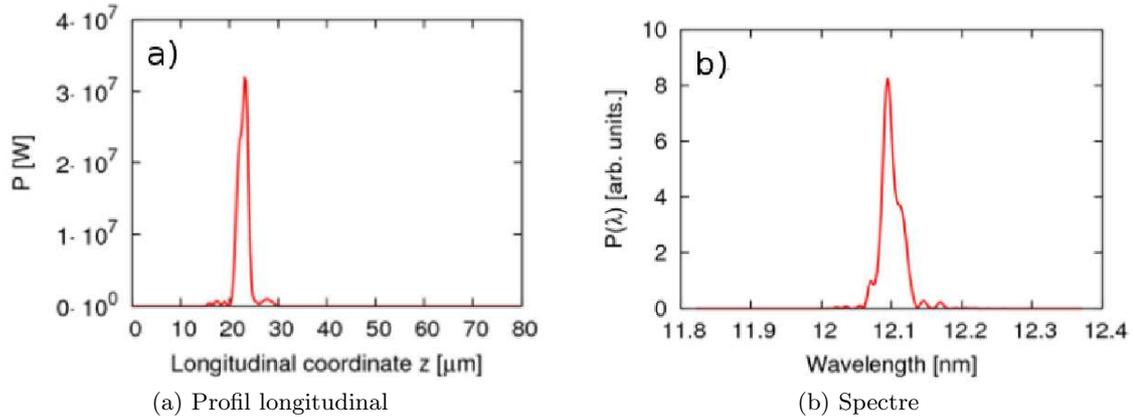


Figure 5. Performance à 12 nm dans la configuration d'écho. Impulsions laser externe : 30 fs de largeur FWHM, 15 MW et 88 MW de puissance crête pour la première et deuxième impulsion.

4 Conclusion

Le processus d'écho peut être obtenu dans différents types de milieu (gaz, liquide, plasma). Dans les paquets d'électrons relativistes, utilisés pour produire un rayonnement synchrotron, un processus d'écho peut être obtenu en manipulant les électrons avec des lasers externes et des zones dispersives. Le potentiel de ce schéma est très attractif puisque sur anneau de stockage, son application permettrait d'obtenir des impulsions femtoseconde jusque dans le domaine des rayons X-mou. Sur laser à électrons libres simple passage, ce processus doit permettre de produire des impulsions femtosecondes totalement cohérentes avec une puissance crête élevée (MW, GW) dans le domaine des rayons X-mou. Néanmoins, la démonstration expérimentale à courtes longueurs d'onde n'est toujours pas faite, et un des objectifs du projet français LUNEX5 est de répondre à cette problématique.

Références

1. R. W. GOULD, Plasma wave echo, *Physical Review Letters*, **19**, 219 (1967)
2. J.H. MALMBERG, C.B. WHARTON, R.W. GOULD & T.M. O'NEIL, Observation of plasma wave echoes, *Physics of Fluids*, **11**, 1147 (1968)
3. J. VANNESTE, P.J. MORRISON & T. WARN, Strong echo effect and nonlinear transient growth in shear flows, *Physics of Fluids*, **10**, 1398 (1998)
4. T. MOSSBERG, R. KACHRU, E. WITHTAKER & S. R. HARTMANN, Temporally recurrent spatial ordering of atomic population in gases : Grating echos, *Physical Review Letters*, **43**, 851 (1979)
5. D.V. STREKALOV, A. TURLAPOV, A. KUMARAKRISHAN & T. SLEATOR, Periodic structures generated in a cloud of cold atoms, *Physical Review A*, **66**, 023601 (2002)
6. E. OTT, J. H. PLATING, T. M. ANTONSEN & M. GIRVAN, Echo phenomena in large systems of coupled oscillators, *Chaos*, **18**, 037115 (2008)
7. G. STUPAKOV, Using the beam-echo effect for generation of short-wavelength radiation, *Physical Review Letters* **102**, 074801 (2009)
8. C. EVAIN, M. E. COUPRIE, A. NADJI, A. LOULERGUE, J. M. FILHOL & A. A. ZHOLENTS, Soft X-ray femtosecond coherent undulator radiation in a storage ring, *New Journal of Physics*, **14**, 023003 (2012)
9. LUNEX5, Laser à électrons libres Utilisant un accélérateur Nouveau pour l'Exploitation de rayonnement X de 5^{ème} génération, *Conceptual Design Report*, SOLEIL (2011)
10. D. XIANG & G. STUPAKOV, Enhanced tunable narrow-band THz emission from laser-modulated electron beams, *Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams*, **12**, 080701 (2009)
11. D. XIANG, E. COLBY, M. DUNNING, S. GILEVICH, C. HAST, K. JOBE, D. MCCORMICK, J. NELSON, T. O. RAUBENHEIMER, K. SOONG, G. STUPAKOV, Z. SZALATA, D. WALZ, S. WEATHERSBY, M. WOODLEY & P.-L. PERNET, Demonstration of the echo-enabled harmonic generation technique for short-wavelength seeded free electron lasers, *Physical Review Letters*, **105**, 114801 (2010)
12. Z. T. ZHAO, Progress in SDUV-FEL and Development of X-Ray FELs in Shanghai, *Free Electron Laser Conference (FEL'10)*, p. 15 (2010)
13. A. A. ZHOLENTS & M. S. ZOLOTOREV, Femtosecond X-ray pulses of synchrotron radiation, *Physical Review Letters*, **76**, 912-915 (1996)
14. R. W. SCHOENLEIN, S. CHATTOPADHYAY, H. H. W. CHONG, T. E. GLOVER, P. A. HEIMANN, C. V. SHANK, A. A. ZHOLENTS, & M. S. ZOLOTOREV, Generation of femtosecond pulses of synchrotron radiation, *Science*, **287**, 2237-2240 (2000)
15. S. REICHE, GENESIS 1.3 : a fully 3D time-dependent FEL simulation code, *Nuclear Instruments and Methods in Physics A*, **429**, 243-248 (1999)