

# Vers une nouvelle génération d'oscilloscopes temps réel

La faisabilité d'un concept d'échantillonnage original est démontrée à partir d'un principe de stroboscopie, sur fibres optiques monomodes, en vue de la réalisation d'oscilloscopes *temps réel* de nouvelle génération dans le domaine gigahertz - térahertz. Nous validons par l'expérience la possibilité d'acquérir la forme d'une impulsion dans une bande passante de mesure de 100 GHz.

A. Jolly • J.-F. Gleyze CEA - CESTA

## Le concept d'échantillonnage

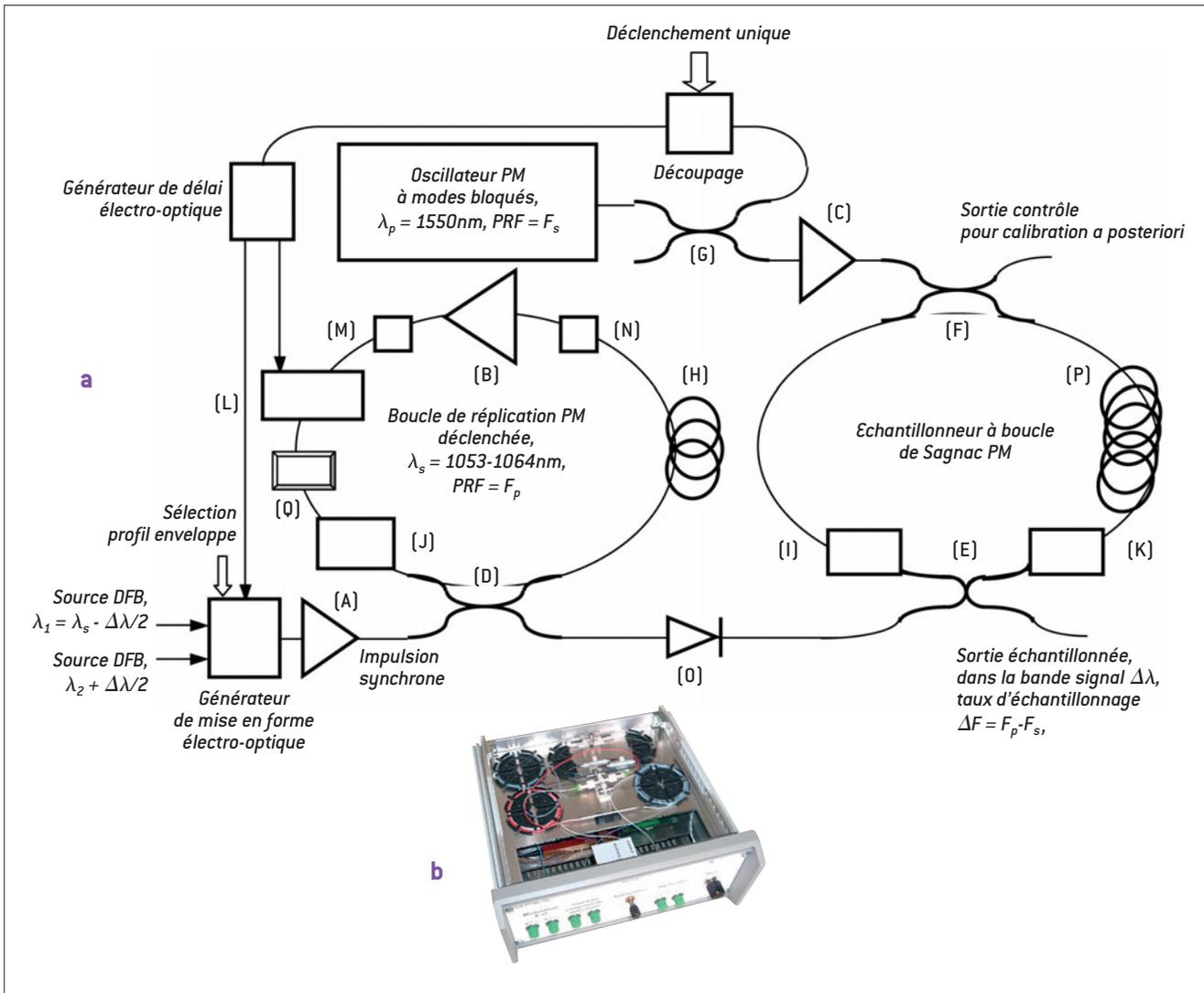
Un nouveau concept d'échantillonnage *tout optique* [1], dédié à la réalisation d'oscilloscopes *temps réel* de nouvelle génération, a été proposé dans l'objectif de performances de mesure inaccessibles par voie électronique : une bande passante de mesure pouvant atteindre 300 gigahertz (GHz) et une dynamique d'échantillonnage de 30 dB, soit  $\sim 10$  bits de codage. Par rapport aux oscilloscopes électroniques actuels les plus rapides, limités entre 10 et 30 GHz, il s'agit d'une avancée considérable. L'idée de base consiste à mettre en œuvre, sur fibres monomodes, un procédé de stroboscopie temporelle incluant :

- > une fonction de réplification dans une boucle quasi résonante, fournissant un grand nombre de répliques issues de l'impulsion à analyser ;
- > une fonction d'échantillonnage de très haut contraste, sur les répliques, à la cadence définie par une horloge laser asynchrone.

La fonction d'échantillonnage permet de quantifier la valeur instantanée du signal. Elle est déclenchée par une horloge continue, de telle sorte que les points échantillonnés soient décalés d'un intervalle de temps donné entre deux répliques successives. Ce principe de balayage temporel, analogue à celui d'un stroboscope, est connu en électronique. Mais son application à une impulsion unique, répliquée dans le domaine optique, est nouvelle. Un mode de réalisation est présenté sur la **figure 1**, dans une architecture totalement fibrée. La fonction de réplification est intégrée dans une boucle unidirectionnelle incluant un amplificateur à terre rare [2], ou paramétrique [3], refermée sur un coupleur en X. Une réplique est générée à chaque tour (**figure 1a**, gauche). L'amplificateur permet de caler le gain de boucle près de l'unité,

pour y faire tourner l'impulsion incidente aussi longtemps que nécessaire, en préservant un rapport signal sur bruit satisfaisant. L'enveloppe du train de répliques est inscrite dans un gabarit borné. Malgré un chemin optique dispersif et plus ou moins long, typiquement plusieurs kilomètres, une bande passante de mesure excessivement large peut être préservée. Typiquement 100 GHz dans l'architecture optique de base, celle présentée ici, et potentiellement 300 GHz à 1 THz dans une configuration optimisée. L'horloge est une source à modes bloqués de durée d'impulsion sub-picoseconde (ps). Elle déclenche l'échantillonneur. Ce dernier, équivalent à un générateur de porte ultra rapide, est ici réalisé à l'aide d'une boucle de *Sagnac* de structure interférométrique [4]. Le principe consiste à exploiter l'effet *Kerr* dans la silice, en régime de propagation à haute intensité laser (**figure 1a**, droite). Les valeurs de résolution temporelle et de contraste obtenues varient de 0,3 à 3 ps et de 25 à 40 dB, respectivement. L'ensemble *boucle de réplification + échantillonneur* constitue le cœur optique de l'oscilloscope. Le profil de l'impulsion incidente est restitué *a posteriori*, après conversion sous forme électrique, pondération à l'aide d'un coefficient correctif fixé par la forme de l'enveloppe du train de répliques puis repositionnement au pas temporel défini par le taux d'échantillonnage effectif.

Les différentes solutions envisageables pour la réalisation des deux fonctions optiques de base ont été étudiées dans le cadre d'un projet de R&D pluri-annuel, cofinancé par le CEA-DAM et le Conseil Régional d'Aquitaine sur la période 2006 - 2009. Un *consortium* a ainsi été constitué sur la base de collaborations *intra* DAM et CEA - Université, avec



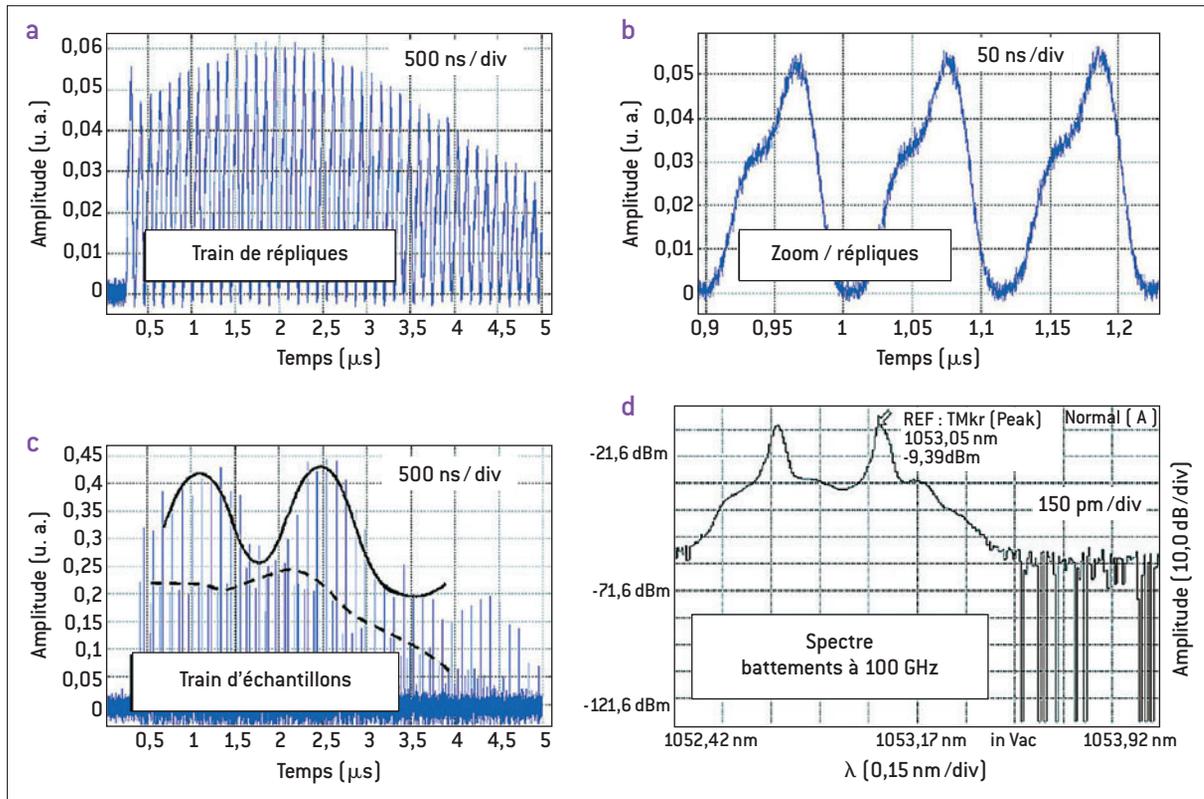
**Figure 1.** [a] Configuration fibrée synchronisée sur une boucle de Sagnac, avec les composants suivants  
 {[A], [B]} = amplificateur sur fibre dopée à Ytterbium (YDFA) et à maintien de polarisation (PM),  
 [C] = amplificateur Erbium PM, {[D], [E], [F], [G]} = coupleurs 50-50% PM, [H] = bretelle PM pour le calage de la synchronisation,  
 {[I], [J], [K]} = contrôleurs de polarisation, [L] = modulateur acousto-optique, {[M], [N]} = filtres spectraux, [O] = isolateur optique,  
 [P] = fibre non linéaire courte, [Q] = ligne à retard fibrée PM de longueur ajustable par pas sub-millimétrique.  
 [b] Photographie du dispositif.

les instituts XLIM à Limoges, FEMTO à Besançon, et le laboratoire PHLAM à Lille.

### Validation d'une bande passante de 100 GHz sur impulsion à battement de fréquences

La première démonstration expérimentale [5] est conduite à 1 053 nm, longueur d'onde fondamentale pour la LIL et le LMJ. Le taux d'échantillonnage, défini par l'inverse de l'écart de période entre la réplication et l'horloge, est ajusté entre 1 et 10 THz. Côté réplication, le phénomène d'accumulation progressive de bruit sur le signal constitue la limite de performances essentielle : sur 1 000 répliques,

la dégradation de la dynamique sur le signal varie de 2 à 4 bits. Côté échantillonnage, l'optimisation des performances est basée sur la maîtrise des mécanismes de modulation de phase croisée et d'auto-modulation de phase sur le tronçon de fibre non linéaire utilisé dans la boucle de Sagnac. L'horloge étant maître, le schéma retenu tient compte des contraintes de synchronisation et de caractérisation. L'impulsion *signal* à analyser est formée à l'intérieur d'une enveloppe composite dont la zone avant, monomode, est lentement variable. La zone arrière présente des modulations intenses, produites par le battement de deux raies laser décalées. Le contrôle de l'écart spectral qui



**Figure 2.** Validation du concept d'échantillonnage : (a), (b) et (c) chronogrammes enregistrés en configuration d'échantillonnage en temps réel et (d) spectrogramme sur une impulsion de signal modulée par battement de deux fréquences autour de 1 053 nm, avec une fréquence de modulation égale à 100 GHz.

fixe la période de battement permet de fabriquer un signal « de référence », parfaitement connu. Notre configuration expérimentale permet d'acquérir deux points par réplique, zone par zone. La présence des modulations est mise en évidence par comparaison directe des deux séries couplées (figure 2). Ceci permet de matérialiser le processus stroboscopique de manière simple et visuelle, dans une gamme de temps hors de portée des instruments disponibles sur le marché. Nous avons ainsi constitué le cœur d'un oscilloscope *temps réel* de bande passante 100 GHz et de dynamique supérieure à 25 dB. La limite de bande passante ultime est conditionnée par les effets de dispersion spectrale pendant la réplique. Les solutions pour étendre la bande passante à 300 GHz et plus sont basées sur l'adjonction de fibres micro-structurées et de filtres de *Lyot* accordables, selon le principe générique d'une égalisation fine du gain spectral de la boucle. Les points critiques majeurs dans ce qui devrait déboucher à terme sur une nouvelle

technologie d'oscilloscope *tout optique - temps réel* étant clairement identifiés, de nouveaux champs d'application sont aujourd'hui ouverts en matière de métrologie d'impulsions. Ils restent maintenant à explorer.

## RÉFÉRENCES

- [1] Brevet CEA PCT/FR2005/050437 [2004].
- [2] A. JOLLY *et al.*, "Static and Synchronised Switching Noise Management of Replicated Optical Pulse Trains", *Optics Com.*, **264**, p. 89-96 (2006).
- [3] Th. SYLVESTRE *et al.*, "Parametric amplification and wavelength conversion in the 1040-1090 nm band by use of a photonic crystal fiber", *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 111104 (2009).
- [4] A. JOLLY, C. GRANIER, "All - Optical Sampling with Sagnac Switches Using Closed Pump and Signal Wavelengths near 1  $\mu$ m", *Optics Com.*, **281**, p. 3861-3871 (2008).
- [5] A. JOLLY *et al.*, "Demonstration of a true single-shot 100 GHz-bandwidth optical oscilloscope at 1053-1064 nm", *Opt. Express*, **17**(14), p. 12109-12120 (2009).