

## LA LUMIERE LENTE ET RAPIDE: UNE FUTURE PIECE MAITRESSE POUR LA PHOTONIQUE

Luc Thévenaz, Miguel González Herráez<sup>1</sup>, Kwang-Yong Song<sup>2</sup>, Sang-Hoon Chin

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Laboratoire de Nanophotonique et de Métrologie  
STI-NAM Station 11  
CH-1015 Lausanne, Suisse

<sup>1</sup> Adresse permanente: Universidad de Alcalá, 28871 Alcalá de Henares, Espagne

<sup>2</sup> Adresse permanente: University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japon

Luc.Thevenaz@EPFL.CH

### RESUME

Nous présentons une technique permettant de réaliser un contrôle extensif et très souple de la vitesse de groupe de signaux se propageant dans une fibre optique. Ce contrôle, directement piloté par une source lumineuse, est effectué par le truchement de gains ou de pertes générés dans la fibre par diffusion Brillouin stimulée. Nos résultats montrent que des vitesses de groupe inférieures à 71'000 km/s d'une part, dépassant la vitesse de la lumière dans le vide d'autre part, et même des vitesses négatives, ont pu être obtenues à l'aide d'un simple montage tenant sur une table optique.

**MOTS-CLEFS :** *Optique non-linéaire, lumière lente et rapide, diffusion Brillouin stimulée.*

### 1. INTRODUCTION

La lumière lente et rapide est un sujet qui a retenu beaucoup d'attention ces dernières années, non seulement en raison de résultats spectaculaires, tels que le ralentissement de la lumière jusqu'à la vitesse d'une bicyclette (17 m/s) [1], mais aussi pour toutes les potentialités qu'elle offre pour le contrôle temporel des signaux optiques – la photonique étant jusque là privée de cet outil – avec en perspective le développement de lignes de retard et de mémoires tout optiques.

Si, jusqu'à récemment, les résultats présentés, bien que spectaculaires, restaient essentiellement des prouesses scientifiques confinées en laboratoire en raison des conditionnements extrêmes requis par les milieux optiques (gaz ultra-froids, par exemple), la démonstration récente par notre équipe [2] de la possibilité de réaliser de substantielles variations de la vitesse de groupe d'un signal dans une fibre optique, de surcroît à température ambiante et aux longueurs d'ondes standards, a ouvert une brèche vers les applications pratiques. Depuis lors, en moins de deux ans, la technique a été raffinée et étendue grâce aux efforts de plusieurs équipes, pour se rapprocher des besoins des utilisateurs potentiels, tout en mettant en évidence les limitations intrinsèques à la lumière lente, qui l'empêcheront sans doute de relever l'entier des défis auxquels elle doit faire face.

### 2. PRINCIPE

Il est tout d'abord essentiel de saisir que la lumière lente et rapide ne concerne que la *vitesse de groupe* de la lumière, et que celle-ci dans l'absolu ne représente que la vitesse de propagation du motif principal d'un signal, tels que le sommet d'une impulsion ou l'enveloppe d'une modulation sinusoïdale. Elle ne représente pas la vitesse pertinente en interférométrie de phase, ni surtout celle de l'information. Dans des conditions ordinaires de propagation, soit dans une large fenêtre spectrale de transparence, toutes ces vitesses peuvent se confondre, mais ce ne sera plus le cas dans les conditions extrêmes d'un milieu permettant la génération de lumière lente et rapide. Ceci explique que certains résultats ne brisent qu'en apparence les principes issus de la relativité restreinte et de la causalité.

Pour obtenir une modification sensible de la vitesse de groupe, il est nécessaire de générer dans le milieu une résonance spectrale étroite, qui peut être une courbe de gain - donnant lieu à un ralentissement du signal lumineux – ou une raie d'absorption qui va, elle, accélérer ce signal. Le

principe est basé sur le fait se déduisant des relations de Kramers-Kronig qu'à toute variation spectrale de l'amplitude de la lumière correspond une variation de sa phase, avec une relation bien définie entre ces 2 variations. Cette variation de phase est assimilable à un changement de l'indice de réfraction  $n$ . Comme la vitesse de groupe  $V_g$  peut également être représentée par un indice  $n_g$  tel que  $V_g = c/n_g$ , et comme celui-ci s'exprime simplement en fonction de l'indice de réfraction par la relation suivante:

$$n_g = n + \nu \frac{dn}{d\nu}$$

on voit que, par l'effet du terme le plus à droite, une variation rapide de l'indice de réfraction  $n$  en fonction de la fréquence optique  $\nu$  va donner lieu à un changement substantiel de l'indice de groupe  $n_g$ . En règle générale, dans les zones de transparence, ce terme n'apporte qu'une modification mineure, mais dans les résonances optiques, celui-ci peut devenir très important et même dépasser la valeur de l'indice de réfraction! Comme ce terme peut être positif ou négatif, il est donc possible de diminuer la valeur de l'indice de groupe pour le rendre inférieur à 1 (propagation supraluminale), voire l'annuler jusqu'à lui faire changer de signe (vitesse négative).

Pour y parvenir dans une fibre optique, le moyen le plus efficace est la diffusion Brillouin stimulée (DBS), qui est un effet non-linéaire devant satisfaire à une relation d'accord de phase très sévère, ce qui permet de générer des courbes de gain très étroites même dans un milieu aussi désordonné que la silice. En pompant la fibre à une fréquence optique  $\nu_o$ , une onde se propageant en sens opposé va pouvoir subir une amplification spectralement très étroite (env. 25 MHz) si elle se situe à une fréquence optique  $\nu_o - \nu_B$  inférieure à l'onde de pompe ( $\nu_B = 10-11$  GHz). Cette même onde va subir une perte si elle se situe à une fréquence optique  $\nu_o + \nu_B$  supérieure à l'onde de pompe. Ainsi, il sera possible de générer de la lumière lente ou rapide, selon que l'on se place spectralement au-dessus ou au-dessous de la fréquence de la pompe [2,3], selon le schéma présenté dans la Fig. 1.

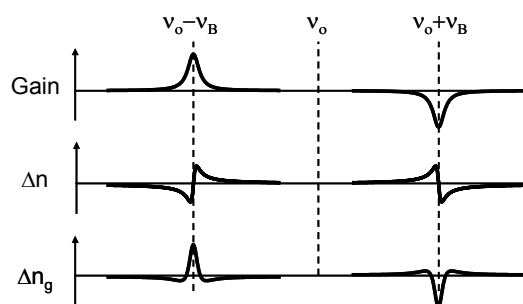


Fig. 1 Description schématique du principe permettant le retardement ou l'avancement d'un signal à l'aide de la diffusion Brillouin stimulée ( $\nu_o$ : fréquence de la pompe).

### 3. RESULTATS

Le principe de la mesure est extrêmement simple: une fibre optique est pompée à l'aide d'une source monochromatique de fréquence  $\nu_o$  et le signal est propagé en sens inverse avec une différence de fréquence  $\nu_B$  par rapport à la pompe. Si la fréquence est inférieure à celle de la pompe, le signal subira un gain et sera ralenti; si elle est supérieure avec le même écart, le signal sera atténué et accéléré. En utilisant la DBS dans une fibre optique ordinaire en silice, on obtient un retard (avance) de 1 ns par dB de gain (perte) généré dans la fibre. Comme la différence de fréquence entre pompe et signal doit être stable et précise, les ondes en interaction sont générées à partir d'un seul laser, suivi d'un modulateur électro-optique piloté par un générateur micro-onde à la fréquence  $\nu_B/2$  [2,3]. Les bandes latérales de modulation constituent alors les ondes de pompe et de signal, respectivement, et sont séparées par filtrage optique pour être injectées à chaque extrémité de la fibre.

Remarquablement, le retard induit ne dépend que du gain cumulé le long de la fibre. Comme la DBS est l'effet non-linéaire le plus efficace dans les fibres, il suffira d'une puissance de pompe d'une dizaine de mW pour générer un gain de 30 dB dans quelques kilomètres de fibre, gain qui a son tour causera un retard de 30 ns sur le signal. Il est clair que, dans cette situation, la variation de vitesse de groupe est faible, mais le faible gain réparti sur une grande longueur s'accumule pour finalement donner un retard appréciable, qui est la seule quantité importante pour les applications.

Pour générer de fortes variations de vitesse de groupe et donner lieu à des conditions de propagation extrêmes (fort ralentissement, propagation supraluminale et vitesses négatives), il faut

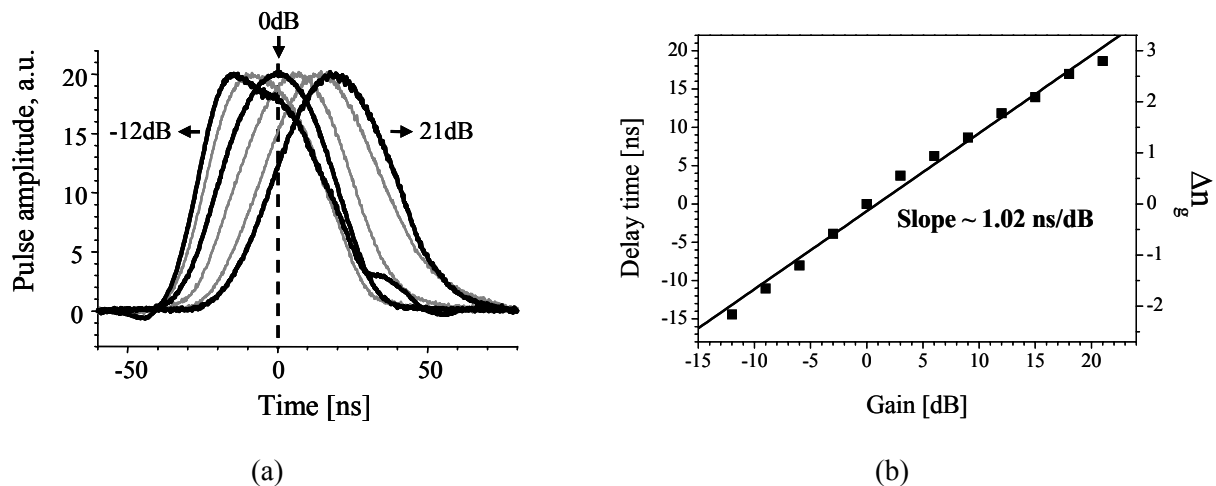


Fig. 2. (a) Traces temporelles des impulsions à la sortie d'une fibre de 2 mètres, pour différents gains et pertes, mettant en évidence les écarts temporels générés par DBS. La trace 0 dB correspond à une propagation normale, la trace -12 dB a une vitesse de groupe négative; (b) Retards mesurés sur des impulsions de 40 ns et modifications de l'indice de groupe correspondantes, réalisés dans 2 mètres de fibre standard. [3]

créer un gain très fort sur une distance très courte. Nous avons pu le réaliser en générant un gain de plus de 20 dB dans une fibre de 2 mètres, à l'aide de puissance de pompe de plusieurs Watts. Les résultats présentés dans la Fig. 2 montrent que les variations d'indices de groupe générées ainsi sont supérieures à la valeur de l'indice lui-même. Ainsi, en régime de vitesse lente, une valeur de 4.26 pour l'indice de groupe a pu être atteinte, ce qui correspond à un ralentissement d'un facteur 3 environ par rapport à la vitesse normale, qui passe ainsi de 205'000 km/s à 71'000 km/s. Plus étrange, en régime de vitesse rapide, l'indice diminue progressivement pour atteindre des valeurs inférieures à l'unité, et même en fin de compte la valeur extrême de -0,7! Il s'agit d'un régime de vitesse de groupe négative, ce qui signifie que le sommet d'une impulsion va sortir de la fibre avant d'y être entré! Ce paradoxe apparent avait été déjà largement discuté et résolu par Brillouin et Sommerfeld dans les années 1910 et ne s'avère possible que grâce à une distorsion sévère de l'impulsion, ce qui permet de préserver la causalité et tous les acquis de la Relativité.

#### 4. PERSPECTIVES

Depuis ces premiers travaux, de substantiels progrès ont été obtenus ces 2 dernières années dans le but de faire de la lumière lente et rapide un véritable outil de synchronisation temporelle pour la photonique. Citons la réalisation de retard jusqu'à 152 ns, soit plus de 3 fois la largeur de l'impulsion [4], l'augmentation de la bande passante de 25 MHz jusqu'à 12 GHz et la réalisation de retard sans variation d'amplitude du signal. La lumière lente et rapide est très proche de devenir un outil pour générer des retards sur des signaux analogues, mais de substantiels efforts et de nouvelles voies seront à ouvrir pour développer un outil approprié pour traiter l'information optique numérique.

#### REFERENCES

- [1] V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, Nature (London) 397, 594 (1999).
- [2] K. Y. Song, M. Gonzalez-Herraez, and L. Thévenaz, Optics Express 13, 82 (2005).
- [3] M. Gonzalez-Herraez, K. Y. Song, L. Thévenaz, Applied Physics Letters, 87, 081113, 2005.
- [4] K. Y. Song, M. Gonzalez-Herraez, and L. Thévenaz, Opt. Lett. 30, pp. 1782-1784, 2005.
- [5] M. Gonzalez Herraez, K. Y. Song and L. Thévenaz, Opt. Express 14, 1395-1400 (2005).
- [6] Z. Zhu, Andrew M. C. Dawes, Lin Zhang, A.E. Willner and D.J. Gauthier, OFC Tech. Digest (2006), PDP 1
- [7] L. Thévenaz, S.H. Chin, M. Gonzalez Herraez, ECOC 2006 Proceedings, Paper Tu1.1.2 (2006)