

# Lumière lente par interactions non linéaires et cavités à cristaux photoniques

Patricio Grinberg

26 novembre 2012

La première mesure expérimentale de la vitesse de la lumière a été réalisée en 1848 par Hippolyte Fizeau [Fizeau 1849] utilisant une méthode de temps de vol. Il a mesuré le temps qu'il faut à une impulsion optique créée avec une roue dentée tournante, pour faire l'aller-retour entre deux miroirs fixes: l'un à son domicile à Suresnes et l'autre à Montmartre à Paris. Cette mesure pionnière de Fizeau a encore été améliorée par le remplacement de la roue dentée par un miroir tournant et en augmentant la distance de propagation. On sait que la vitesse mesurée par Fizeau est ce qu'on appelle la vitesse de groupe,  $v_g$ , et que celle-ci peut être manipulée et particulièrement réduite considérablement par rapport à la vitesse de la lumière dans le vide  $c = 300000$  km/s.

Les premières études théoriques de propagation de la lumière dans les médias avec des vitesses de groupe réduites remontent à 1880 lorsque Lorentz [Lorentz 1880] a développé la théorie classique de la dispersion des ondes électromagnétiques. La propagation lente des ondes électromagnétiques a été observée pour la première dans la gamme des micro-ondes en 1950 [Pierce 1950].

Ce champ a été au cœur d'intenses recherches depuis deux décennies. En 1999, L.V. Hau et ses collègues ont été les premiers à obtenir de la lumière lente via transparence induite électromagnétiquement (TIE) dans un condensat de Bose-Einstein [Hau 1999]. L'effet consiste à produire un trou spectral d'absorption étroite qui induit une forte dispersion de l'indice de réfraction. De nombreux groupes sont aujourd'hui en mesure de ralentir la vitesse de la lumière atteignant des vitesses de groupe de quelques mètres par seconde [Baldit 2005], allant jusqu'à arrêter le mouvement de la lumière entièrement [Phillips 2001].

Une voie alternative à l'approche atomique a également été intensivement explorée afin de manipuler la vitesse de groupe pour obtenir la lumière lente. Il s'agit de la manipulation du diagramme de dispersion photonique via l'ingénierie géométrique des propriétés optiques de matériaux transparents. C'est particulièrement le cas dans les structures où il ya une variation périodique de la constante diélectrique, comme dans les miroirs de Bragg et les cristaux photoniques (CP) [Notomi 2001].

Les deux options pour générer une lumière lente, dispersion atomique et structuration de matériaux ont été explorées en parallèle par des équipes venant d'horizons différents. Ce n'est que récemment que les deux approches ont com-

mené à être considérées ensemble, générant un intérêt accru ainsi que quelques controverses. Du côté structuration, il est maintenant largement admis que des indices de groupe,  $n_g = c/v_g$ , supérieurs à 30 sont difficilement réalisables avec des CP en raison de la forte augmentation des pertes qui suivent au moins une dépendance linéaire en  $n_g$ . Par contre, des vitesses de groupe ultra faibles, plus de 5 ordres de grandeur inférieures à  $c$ , sont actuellement obtenues par TIE et par le biais du phénomène des oscillations cohérentes de la population (OCP) [Boyd 1981] dans des systèmes atomiques. Par ailleurs, la transmission optique pour être proche de 100 %, en dépit de l'indice de groupe extrêmement élevé. Les pertes sont donc indépendantes de l'indice de groupe. Ce paradoxe apparent est facilement résolu si l'on considère les mécanismes physiques mis en œuvre dans ces approches qualitativement différentes. La lumière lente induite par structuration de la matière est essentiellement associée au temps de retard introduit par l'augmentation de la distance de propagation. La lumière lente obtenue par des interactions non linéaires n'est pas associée à l'augmentation de la distance de propagation et ne génère donc pas de pertes supplémentaires. Ce débat soulève la question de bénéficier des atouts des deux approches en combinant dans la même structure la lumière lente obtenue par interaction non linéaire et la lumière lente obtenue par l'ingénierie des indices de refraction.

L'étude de cette association de lumières lentes et l'objet de ma thèse. Je commence par rappeler les différentes façons qui permettent d'obtenir la lumière lente (partie I).

Dans le chapitre 1, je décris l'effet des oscillations cohérents de population (OCP) utilisé dans cette thèse pour obtenir une forte dispersion de l'indice de réfraction dans les puits quantiques semi-conducteurs, et ainsi la lumière lente par effet non linéaire. Dans le chapitre suivant 2, je donne une brève description des cristaux photoniques (CP) et je montre comment ils peuvent être utilisés pour construire des nanocavités, des guides d'ondes et comment les CP induisent des indices de groupe élevés.

La thèse est par la suite séparée en deux parties. La partie II est consacrée au ralentissement de la lumière par effet OCP dans des cavités à CP, tandis que la partie III est consacrée à la combinaison des modes lents de guides d'ondes à CP avec la lumière lente obtenue par effet OCP.

Dans la partie II, je commence (dans le chapitre 3) en décrivant théoriquement l'effet OCP dans une cavité en utilisant la théorie des modes couplés. La description théorique montre que le comportement non linéaire de la cavité provoquée par les puits quantiques actifs ne peut pas être négligé, ni dissocié de l'effet OCP. Ensuite, dans le chapitre 4, le dispositif expérimental et les résultats obtenus sont présentés et confrontés à la théorie. Une forte augmentation de la durée de vie est démontrée, obtenant un facteur de qualité équivalent de 520000 qui correspond à une amélioration d'un facteur 138 par rapport au facteur de qualité initial de la cavité à CP.

La partie III est dédiée à l'association de la lumière lente par effet OCP aux modes lents des guides d'ondes à CP. Je commence dans le chapitre 5 en développant un modèle perturbatif simple pour mieux comprendre l'évolution de l'indice du groupe et l'absorption du système lorsque l'effet OCP est associé avec

le mode lent du guide à CP. Cette model perturbative montre que l'interaction lumière matière a une dépendance linéaire avec l'indice de groupe initial due à la structuration du matériau formant le guide à CP, et ne depend pas de l'indice de groupe associé à l'effet OCP. Dans le chapitre 6, je présente la problématique du couplage de la lumière dans un guide d'onde à CP et propose une système alternative pour coupler la lumière dans le guide d'ondes de l'espace libre en utilisant une super réseau. Ce système est aussi validé expérimentalement dans des guides d'ondes à CP transparents (sans puits quantiques). Le chapitre 7 présente les résultats préliminaires sur les guides d'ondes à CP actives et montrent des retards importants par rapport au retards obtenues sans l'effet OCP.

Le chapitre 8 donne, enfin, les conclusions et les perspectives de ce travail.

## References

- [Baldit 2005] Elisa Baldit, Kamel Bencheikh, Paul Monnier, Juan Ariel Levenson and V. Rouget. *Ultraslow Light Propagation in an Inhomogeneously Broadened Rare-Earth Ion-Doped Crystal*. Physical Review Letters, vol. 95, no. 14, page 143601, 2005.
- [Boyd 1981] Robert W. Boyd, Michael G. Raymer, Paul Narum and Donald J. Harter. *Four-wave parametric interactions in a strongly driven two-level system*. Physical Review A, vol. 24, no. 1, pages 411–423, 1981.
- [Fizeau 1849] Hippolyte Fizeau. *Sur une experience relative a la vitesse de propagation de la lumiere*. Comptes Rendus de l'Académie des sciences, vol. 29, pages 90–92; 132, 1849.
- [Hau 1999] Lene Vestergaard Hau, Stephen E. Harris, Zachary Dutton and Cyrus H. Behroozi. *Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas*. Nature, vol. 397, no. February, pages 594–598, 1999.
- [Lorentz 1880] H. A. Lorentz. *Über die Beziehung zwischen der Fortpflanzung des Lichtes und der Körperdichte (About the relationship between the propagation of light and the body density)*. Wiedemann Ann., vol. 9, page 641, 1880.
- [Notomi 2001] Masaya Notomi, K. Yamada, Akihiko Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi and I. Yokohama. *Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs*. Physical Review Letters, vol. 87, no. 25, page 253902, 2001.
- [Phillips 2001] D. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. Walsworth and Mikhail D. Lukin. *Storage of Light in Atomic Vapor*. Physical Review Letters, vol. 86, no. 5, pages 783–786, January 2001.

[Pierce 1950] John Robinson Pierce. *Traveling-wave tubes*. The Bell System Technical Journal, vol. 29, no. 1, 1950.