

La pince optique

Depuis le 19^{ème} siècle on sait que la lumière est capable d'exercer une force sur la matière. Pourtant ce n'est qu'en 1986 que le terme de « pince optique » voit le jour avec l'expérience fondatrice d'Arthur Ashkin, chercheur aux « Bell Laboratories » et Prix Nobel de Physique en 1997 pour ses travaux sur le sujet. Cette expérience consiste à modifier la trajectoire de billes de latex de taille micronique plongées dans l'eau à l'aide d'un faisceau laser. L'année suivante, Ashkin piège optiquement, c'est-à-dire qu'il immobilise en utilisant un seul faisceau laser, des cellules vivantes.

Depuis cette découverte, les dispositifs de piégeage sont largement étudiés pour des applications en biologie, en chimie de la matière condensée et en physique. Les principaux avantages de cette technique résident dans le fait qu'elle est non-invasive et non-destructrice et qu'elle permet la manipulation d'objets avec une grande précision (<300 nm).

Le principe d'une pince optique dite « classique » est basé sur la forte focalisation d'un faisceau laser qui crée un fort gradient de champ électro-magnétique (Figure 1a). Une particule diélectrique d'indice de réfraction plus élevé que celui de son environnement subit une force, appelée force de gradient, qui l'attire vers ce fort gradient de champ. En parallèle, une partie de la lumière du laser est réfléchi par la particule, ce qui crée une pression de radiation, appelée force de diffusion, qui tend à pousser la particule le long de l'axe de propagation. Dans certaines conditions expérimentales (essentiellement l'utilisation d'un objectif à forte ouverture numérique), il est possible d'équilibrer les forces de gradient et de diffusion pour immobiliser la particule, qui se retrouve alors piégée en une position proche du point de focalisation du laser.

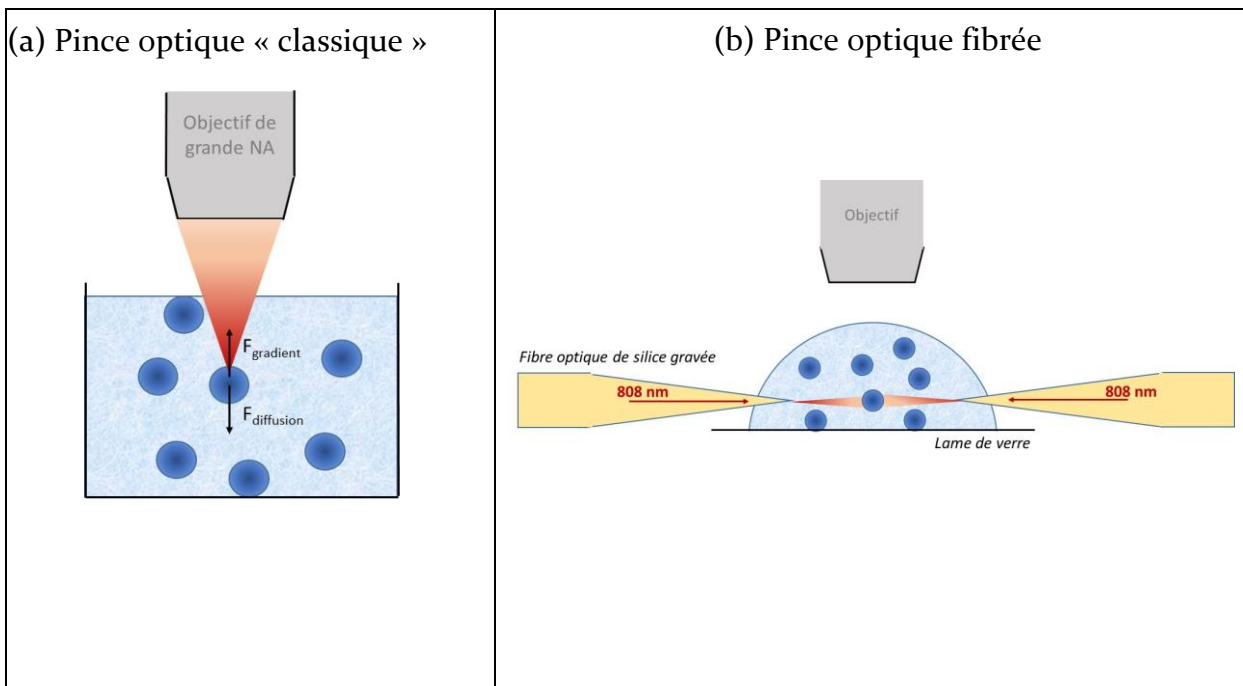


Figure 1 : (a) Principe d'une pince optique « classique » utilisant un faisceau laser focalisé par un objectif de microscope à grande ouverture numérique. La particule diélectrique subit deux forces opposées : la force de gradient due à la forte focalisation du laser et la force de diffusion due à la réflexion de la lumière sur la particule. (b) Dispositif expérimental de piégeage utilisé par l'équipe de J. Fick à l'Institut Néel. Il se compose de deux fibres optiques à cœur de silice pure gravées à l'acide fluorhydrique, par lesquelles sont transmis deux faisceaux laser. Un objectif de microscope est placé au-dessus du dispositif pour observer le piégeage. Les particules à piéger se trouvent dans une goutte de liquide déposée sur une lamelle de verre.

En utilisant cette géométrie dite « classique », il est possible d'immobiliser et de manipuler des particules de latex ou de polystyrène de la taille du micron, des cellules biologiques, des globules rouges etc...

En biologie et en médecine, domaines qui constituent un large champ d'applications pour le piégeage optique, les exemples d'utilisation des pinces optiques sont nombreux. Par exemple, le piégeage de spermatozoïdes et l'étude de la force mise en jeu pour échapper au piège optique grâce à leur mobilité flagellaire constitue un outil de détection de la stérilité¹. On peut également noter que cette technique permet l'étude des propriétés élastiques des matériaux biologiques tels que les membranes ou les protéines. Une expérience a consisté à attacher deux microbilles à une protéine, puis à écarter ces deux billes immobilisées dans des pièges optiques pour déterminer la force exercée sur cette protéine et donc ses propriétés de viscoélasticité. Il a été montré qu'une altération des propriétés visco-élastiques de cette protéine a des conséquences sur les propriétés visco-élastiques du muscle et peut conduire à une diminution des performances musculaires ou cardiaques^{2,3}. Enfin, un dernier exemple plus récent est l'étude des moteurs moléculaires, tels que la kinésine, grâce aux pinces optiques. En effet, en accrochant ces molécules à une bille piégée, on peut analyser et mesurer la force produite par ces moteurs et comprendre comment ils se déplacent dans la cellule.

Tous les exemples cités ci-dessus correspondent à des expériences de micro-manipulation, c'est-à-dire au piégeage d'objets de l'ordre du micron, avec des forces optiques de l'ordre du pN. L'un des enjeux actuels est de piéger et manipuler des objets nanométriques et donc d'augmenter significativement les forces optiques mises en jeu puisque ces forces sont proportionnelles au volume de la particule piégée. Pour cela, les pièges classiques sont délaissés et de nouvelles géométries sont explorées.

La pince optique développée par le groupe de Jochen FICK à l'Institut Néel est composée de deux fibres optiques gravées par un procédé chimique⁴ et dont la pointe fait ~ 100 nm de diamètre. Ces deux pointes se font face à une distance typique de l'ordre de quelques microns, distance qui est ajustable par des platines piézoélectriques sur lesquelles sont montées les fibres (Figure 1b). Un faisceau laser, préalablement séparé en deux par un cube séparateur, est injecté dans chaque fibre et est transmis par chaque pointe. Un tel dispositif permet une grande flexibilité puisque les fibres peuvent être facilement déplacées. Grâce à cette géométrie, l'équipe de Jochen Fick a démontré la possibilité de piéger des billes de polystyrène de $1 \mu\text{m}$ en utilisant de faibles puissances optiques (2 mW)⁵. Si l'intensité lumineuse est identique dans chaque fibre, la particule se piège à égale distance des deux pointes (Figure 2). Il est possible de moduler la position de la particule en modifiant l'intensité relative dans les deux pointes.

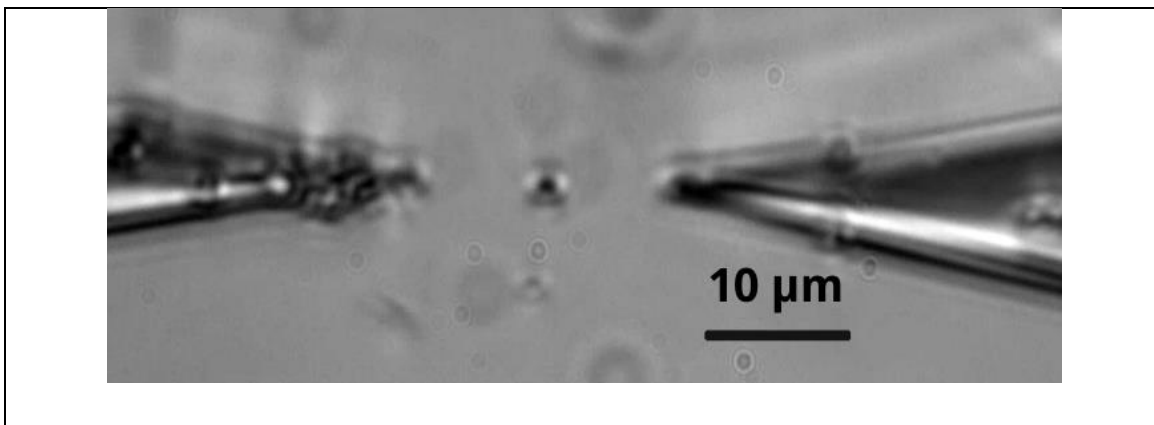


Figure 2 : Piégeage optique d'une bille de polystyrène d'un micron de diamètre, dispersée dans l'eau. Observation en lumière blanche.

Afin d'étudier le piégeage de particules de taille inférieure au micron, il est nécessaire de pouvoir visualiser ces particules autrement que par simple observation en lumière blanche. Des nanoparticules luminescentes ont été

¹ K. König, L. Svaasand, Y. Liu et al. «Determination of mobility forces of human spermatozoa using an 800 nm optical trap» *Cell. Mol. Bio.* 422 (1996) 501

² M.S. Kellermayer, S.B. Smith, C. Bustamante, H.L. Ganzier, «Mechanical fatigue in repetitively stretched single molecules of titin» *Biophys. J.* 80 (2001) 852

³ C. Coirault, J.L. Samuel, D. Chemla et al. «Increased compliance in diaphragm muscle in cardiomyopathic Syrian hamster» *J. Appl. Physiol.* 85 (1998) 1762

⁴ Thèse d'Aurélien Cuche, «Sondes actives pour l'optique en champ proche à base de nanoparticules isolantes ou de nanodiamants fluorescents», Thèse Université Joseph Fourier Grenoble 1 (2009)

⁵ J.B. Decombe, S. Huant, J. Fick, «Single and dual fiber nano-tip optical tweezers: trapping and analysis» *Optics Express* 21 (2013) 30521

synthétisées au laboratoire de Physique de la Matière Condensée. Il s'agit de nanoparticules de YAG:Ce qui présente l'avantage d'avoir une section efficace d'absorption et un rendement élevés, une bonne stabilité colloïdale et dont la synthèse à l'échelle nanométrique est bien contrôlée. Un autre avantage de ce matériau est son indice de réfraction relativement élevé (1.8), ce qui tend à faciliter le piégeage optique.

Le montage expérimental de piégeage a été adapté en ajoutant un miroir dichroïque au microscope situé dans la direction perpendiculaire aux fibres pour permettre la collection de l'émission seule de ces nanoparticules. Des particules de 300 nm ont été piégées avec succès (Figure 3), démontrant la possibilité de piéger et de manipuler des particules submicroniques⁶. Grâce au suivi du mouvement de la particule dans les directions transverse et longitudinale aux fibres, la raideur du piège peut être calculée. Celle-ci est trois fois plus élevée dans la direction transverse que dans la direction longitudinale, ce qui se comprend facilement par la géométrie du piège. La valeur de raideur obtenue dans la direction transverse, normalisée par la puissance du laser, est typiquement de $36 \text{ pN} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, une valeur qui montre la bonne efficacité du piège.

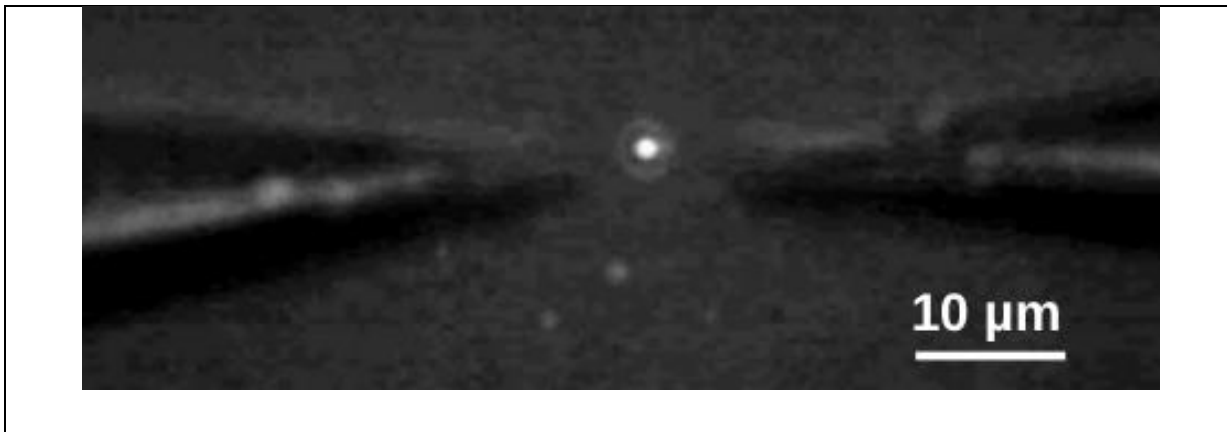


Figure 3 : Piégeage optique d'une particule de YAG dopée Ce^{3+} d'un diamètre de $\sim 300 \text{ nm}$ dans l'eau. Cette image est obtenue en illuminant la particule à 457 nm et en détectant son émission autour de 550 nm .

Le travail actuel se concentre sur le piégeage de particules de YAG:Ce encore plus petites (150 nm et 60 nm) pour déterminer la taille minimale des particules d'indice 1.8 qui peuvent être piégées avec ce dispositif. Il est également envisagé de modifier les pointes en les recouvrant avec une couche métallique pour augmenter encore l'efficacité de piégeage en créant un piège plasmonique.

⁶ J.B. Decombe, G. Dantelle, T. Gacoin, F. J. Valdivia-Valero, G. Colas des Francs, S. Huant, J. Fick, *SPIE Proceeding* 9164 (2014) 916430

Géraldine Dantelle