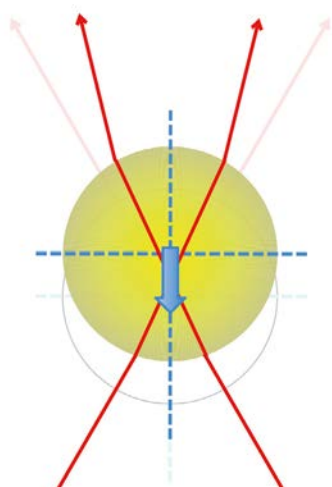


LA PINCE OPTIQUE : UN OUTIL INTERDISCIPLINAIRE

Nathalie WESTBROOK¹, Christoph I. WESTBROOK¹

¹ Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau CEDEX, France

* nathalie.westbrook@institutoptique.fr



L'invention de la pince optique, c'est l'histoire d'un chercheur qui s'amuse mais qui avance méthodiquement et patiemment pour améliorer un concept simple jusqu'à en faire un outil indispensable dans deux domaines de recherche très différents. En biologie et en physique atomique, la pince optique est devenue un instrument de laboratoire courant.

<https://doi.org/10.1051/photon/202110931>

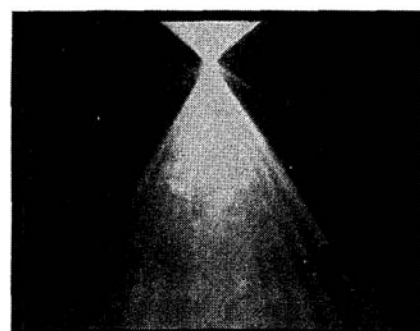
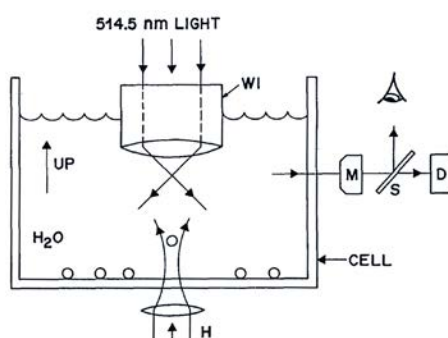
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Au moment où il obtient le prix Nobel en 2018, Arthur Ashkin, 96 ans, en est le récipiendaire le plus âgé. Son état de santé ne lui permettant déjà plus de voyager, il ne peut se déplacer à Stockholm pour recevoir lui-même le prix, et *a fortiori* se déplacer ensuite à travers le monde pour des conférences présentant les pinces optiques et leurs applications en biologie, découverte pour laquelle le prix lui est attribué. Cet état de fait, ainsi que le fait que la même année un chercheur français fait également partie des lauréats, rend cette découverte moins visible, aux yeux du public français en particulier. Pourtant les travaux d'Ashkin sur le piégeage optique donnent un exemple très intéressant d'interdisciplinarité et ils ont eu une portée capitale dans deux domaines

apparemment très différents, la physique atomique et la biologie. Ashkin lui-même s'est intéressé dès le début à ces deux voies de développement. Son approche expérimentale est particulièrement intéressante à raconter dans le cadre de ces « expériences marquantes ».

L'aventure commence avec un premier article publié par Ashkin seul, en 1970 [1]. Il a déjà été relaté qu'Ashkin avait reçu un avis défavorable pour la soumission de ce papier à *Physical Review Letters*, de la part d'un comité interne à *Bell Labs*, qui ne le jugeait pas assez original ●●●

Figure 1. Extrait de l'article d'Ashkin de 1986. À gauche, le schéma de l'expérience : un laser auxiliaire (H) amène des billes de verre vers le foyer de l'objectif de microscope à immersion dans l'eau (W1). Le piégeage est observé sur le côté par un autre objectif (M). À droite : image en fluorescence des rayons déviés par une bille dans le piège. Source : référence [2], adapté avec autorisation © The Optical Society.



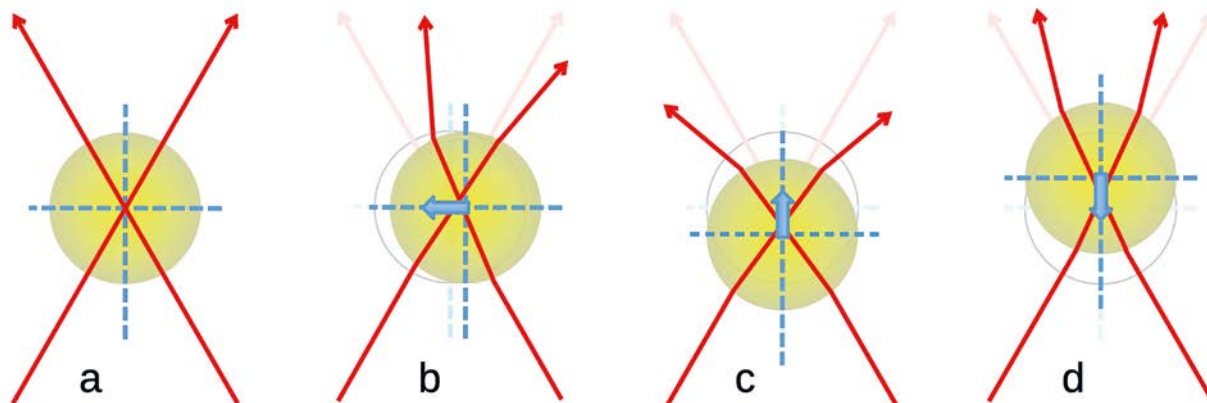
pour être soumis à cette revue, la plus prestigieuse à l'époque pour les publications en physique. Encouragé par son supérieur direct à passer outre cet avis, Ashkin en obtient la publication sans difficulté, et cet article fait maintenant partie des articles les plus cités de *Physical Review Letters*. Rendons tout de même justice aux *Bell Labs* qui, à cette époque, encouragent tous leurs chercheurs à avoir une activité de recherche à côté de leur activité principale afin de ne pas s'enfermer dans un seul domaine. Cela correspondait très bien à l'état d'esprit d'Ashkin qui a pu développer cette activité sur le piégeage, en parallèle de ses travaux principaux sur les lasers et l'optique non linéaire.

Mais revenons au contenu de ces premières expériences : Ashkin y démontre, sur des billes micrométriques plongées dans l'eau, l'effet d'accélération dans la direction de

propagation du faisceau et, plus remarquablement, l'attraction des billes vers le centre d'un faisceau gaussien. Il explique cette attraction par la déviation des rayons lumineux par la bille qui est accompagnée d'un transfert d'impulsion lumineuse (voir encart sur le principe du piégeage). Il montre que la force s'inverse pour une bulle d'air à cause de son indice inférieur à celui du liquide qui l'entoure. Il va même introduire un 2^e faisceau laser se propageant en sens inverse, pour contrer l'accélération et obtenir un piégeage des billes en 3 dimensions. Même si dans cet article Ashkin se concentre surtout sur la pression de radiation, cherchant notamment à prouver qu'il ne s'agit pas d'un effet thermique dû à l'échauffement de l'eau autour des billes, l'effet de piégeage latéral dû au gradient d'intensité est déjà là. Après ce premier article, Ashkin poursuit

ses expériences de piégeage de billes dans l'eau, cherchant à en réduire la taille pour s'approcher du cas des atomes, tout en explorant théoriquement les possibilités du piégeage et du refroidissement d'atomes. En 1986, il publie dans *Optics Letters* [2], avec plusieurs co-auteurs dont Steven Chu (co-lauréat du prix Nobel en 1997 pour la manipulation d'atomes par laser), la première réalisation expérimentale d'un piège stable à trois dimensions en utilisant un seul faisceau laser, focalisé à l'aide d'un objectif de microscope immergé dans l'eau (voir Fig. 1). C'est cette focalisation qui produit un gradient d'intensité suffisant dans la direction longitudinale pour contrer la poussée dans la direction de propagation du faisceau. Les auteurs montrent qu'ils peuvent ainsi piéger des billes de 10 μm de diamètre jusqu'à des tailles aussi petites que 25 nm. Cette configuration

PRINCIPE DE LA PINCE OPTIQUE



Cette illustration s'inspire de l'interprétation en termes de rayons donnée par Ashkin lui-même, qui s'applique bien au cas d'une bille grande devant la longueur d'onde. Pour simplifier, on montre uniquement la déviation des rayons due à la réfraction, en négligeant la réflexion du faisceau par les surfaces. a) La bille est centrée au point de convergence du faisceau laser (rouge) focalisé. Les rayons ne sont pas déviés, la force est nulle. b) La bille est déplacée vers la droite. Les rayons sont réfractés vers la droite, donnant lieu à un transfert d'impulsion du laser vers la bille qui la ramène vers la gauche. c) La bille est déplacée vers le bas. Les rayons sont déviés vers l'extérieur donnant un transfert d'impulsion vers le haut. d) La bille est déplacée vers le haut. Les rayons sont rabattus vers l'axe optique, et le transfert d'impulsion se fait vers le bas. Dans tous les cas, la force est dirigée vers le point de focalisation du laser. L'effet de la réflexion par les surfaces ajoute une force dans la direction moyenne de propagation de la lumière. Pour une focalisation suffisamment forte, la force due à la réfraction domine la force due à la réflexion (pression de radiation) et le piège est stable.

très simple est aujourd'hui la plus utilisée pour ce qu'on a maintenant coutume d'appeler les pinces optiques, notamment en biologie. Cette expérience va marquer toute la recherche future sur les pinces optiques, d'ailleurs cet article est cité plus de 4500 fois (un record absolu pour *Optics Letters*), tant par des biologistes que par des physiciens. Il est intéressant de noter que dans cet article, les auteurs citent un certain G. Roosen : il s'agit bien de Gérard Roosen, chercheur à l'Institut d'Optique, et qui avec Christian Imbert s'est intéressé lui aussi aux effets mécaniques de la lumière sur de petits objets diélectriques, biréfringents ou métalliques, en particulier dans l'idée de tenir en lévitation des cibles contenant du deutérium tritium pour l'étude de la fusion nucléaire [3].

Ce piégeage à un seul faisceau focalisé débouche la même année sur la réalisation du premier piège laser à atomes neutres. Le piégeage des atomes neutres était, depuis le début de ses travaux, l'une des préoccupations d'Ashkin. Cependant, la faible profondeur de ce piège ne permettait pas de capturer des atomes à température ambiante. Il a donc fallu attendre le développement des méthodes de refroidissement d'atomes par laser, auxquelles Ashkin contribue également, pour que ce piège optique prenne toute sa place.

Pour piéger des objets dans l'eau, et en particulier des objets biologiques, la difficulté n'est pas la même, et Ashkin poursuit, avec son collaborateur Joseph Dziedzic, ses expériences dans ce domaine « avec les moyens du bord », beaucoup moins complexes que les expériences sur les atomes. C'est ainsi qu'il publie en 1986 et 1987, deux articles assez courts qui décrivent des expériences amusantes sur plusieurs objets biologiques. Intéressé au départ par le piégeage du virus de la mosaïque du tabac, très petit donc plutôt difficile à piéger, il s'aperçoit qu'il piège très facilement d'autres objets spontanément présents, qu'il identifie rapidement comme étant des bactéries. Son objectif étant au départ de piéger des objets de plus en plus petits, pour lesquels la force exercée par le laser est très faible, il travaille avec le laser puissant le plus courant à l'époque, le laser à argon, et en particulier la raie verte à 514 nm. Il constate alors que ce laser de plusieurs centaines de milliwatts, focalisé sur quelques microns, produit des dommages sur les objets qu'il cherche à piéger : petites billes de latex ou petits objets biologiques. Il a déjà l'idée qu'en passant dans le proche infrarouge les dommages seront moins importants, idée essentielle pour toute la suite des applications en biologie. C'est ainsi qu'il passe au laser Nd:YAG à 1,06 μm et qu'il observe pendant plusieurs heures la division de cellules de levure piégées dans son faisceau laser ou qu'il s'amuse à déplacer des éléments à l'intérieur de cellules de plantes qu'il a collectées dans la mare derrière le labo. Ce côté ludique se ressent particulièrement à la lecture de ces différents articles, qui bien que publiés dans des revues prestigieuses revendiquent le côté qualitatif des expériences réalisées. On peut ainsi lire dans ●●●

DÉCOUVREZ NOS NOUVEAUX PRODUITS POUR L'OPTO-PYROTECHNIE



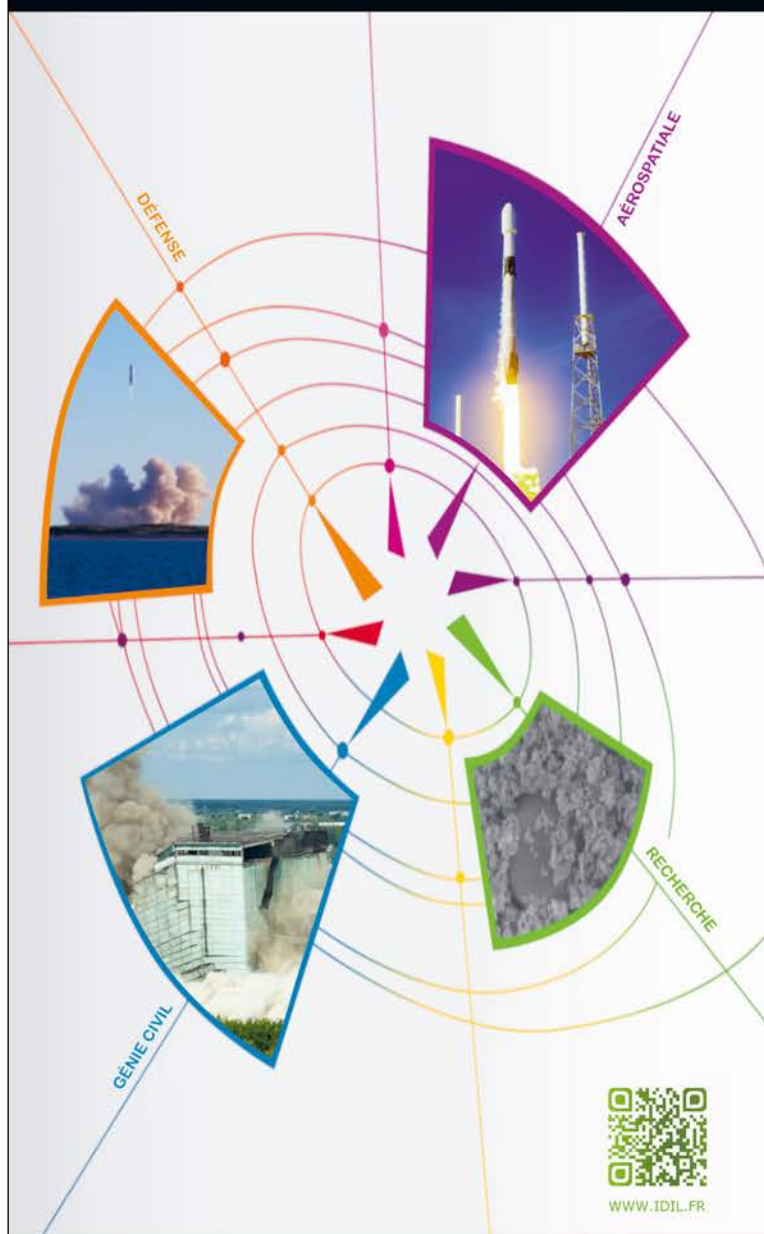
LFU

Laser de mise à feu



OH

Harnais optique



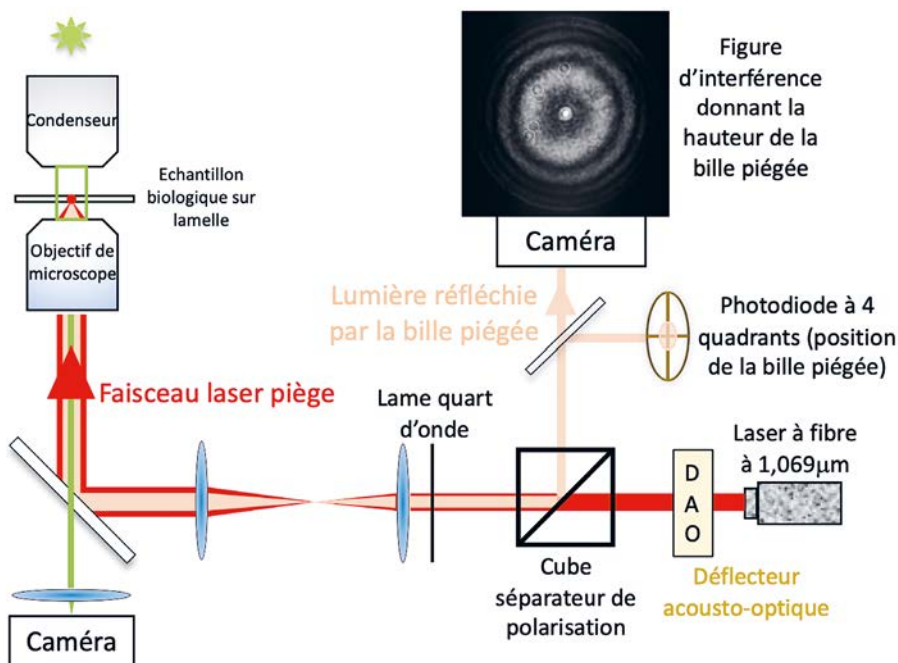


Figure d'interférence donnant la hauteur de la bille piégée

Figure 2. Schéma d'une pince optique au Laboratoire Charles Fabry avec détection en réflexion.

l'article publié dans Proceedings of the National Academy of Sciences en 1988, dans ce qui aujourd'hui s'appellerait « *materials and methods* » : « *Samples of Spirogyra and water-net (Hydro-dicton) algae cells were collected from the back pond of the AT&T Bell Laboratories at Holmdel. Scallion (Allium Cepa) cell samples came from a local supermarket* ». Tout en étant qualitatif et empirique, Ashkin imagine déjà des domaines d'application qui se développeront en biologie par la suite : la mesure de viscosité par exemple, qu'il met en évidence en observant le retour partiel à la position initiale d'un organite à l'intérieur d'un protozoaire.

L'intérêt des pinces optiques pour la biologie démarre plus doucement que du côté des physiciens atomistes, et pendant quelques années Ashkin est le seul à poursuivre dans cette voie. À partir de 1989, d'autres chercheurs s'en saisissent pour étudier la motilité des bactéries ou l'élasticité de l'ADN. Suivront des expériences remarquablement précises et difficiles qui étudient le mouvement de moteurs moléculaires intracellulaires, kinésine, myosine, ribosome avec des résolutions de moins d'un nanomètre dans

les mesures de déplacement [4]. À côté de ces tours de force, les applications en biologie se développent, avec des systèmes commerciaux visant la fécondation *in vitro* (en piégeant des spermatozoïdes) ou le tri cellulaire. Au Laboratoire Charles Fabry, nous les utilisons actuellement pour mesurer la viscosité de caillots sanguins dans lesquels sont insérées des billes micrométriques, et ainsi contribuer à une meilleure

compréhension de la thrombose. La figure 2 montre un schéma de l'expérience.

Du côté de la physique atomique, le « piège optique dipolaire » pour des atomes froids est aussi très répandu. Les chercheurs piègent aussi bien des condensats de Bose-Einstein pour étudier la matière condensée que des atomes individuels pour des applications à l'information quantique. La flexibilité des systèmes de modulation temporelle et spatiale de la lumière permet de réaliser des pièges variables dans le temps et des configurations complexes où une centaine de tels pièges sont réalisés simultanément [5].

L'esprit de simplicité qui fait la beauté de cette expérience marquante réalisée par Arthur Ashkin se retrouve aujourd'hui dans sa mise en œuvre pédagogique dans de nombreux travaux pratiques à travers le monde. Vous pouvez, vous aussi, acquérir une version pédagogique en kit, vous inspirer des publications décrivant des montages de pinces optiques à destination d'étudiants de licence, ou même réaliser des expériences virtuelles avec de l'ADN ou des moteurs moléculaires [6]. Chaque année, au laboratoire d'enseignement expérimental de l'Institut d'Optique, nous piégeons ainsi des cellules de levure de boulanger, dans lesquelles viennent souvent, comme dans les expériences d'Ashkin, s'inviter quelques bactéries. ●

RÉFÉRENCES

- [1] A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **24**, 156 (1970)
- [2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, Opt. Lett. **11**, 288 (1986)
- [3] G. Roosen, Effets mécaniques de la lumière: Étude théorique, expérimentale et applications, Thèse, Université de Paris XI (1978)
- [4] Nobel Committee, Nobel Prize Background 2018, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/advanced-physicsprize2018.pdf>
- [5] A. Browaeys, Reflets de la Physique, N°47-48 36-40 (2016)
- [6] Pour les simulations pédagogiques, voir le site PhET de l'Université du Colorado à Boulder: <https://phet.colorado.edu/fr/simulation/legacy/optical-tweezers>