



Revoir

Utilisation de la nanotechnologie des pinces optiques dans les membranes Études d'interaction

Arnith Eechampati et Chamaree de Silva*

Département de physique, Mercer University, Macon, GA 31207, États-Unis ; aveechampati123@gmail.com

* Correspondance : desilva_c@mercer.edu

Résumé : Les pinces optiques font partie intégrante de la manipulation de cellules microscopiques depuis les années 1990. Les travaux fondateurs d'Arthur Ashkin ont conduit au progrès des pinces optiques en tant qu'outil efficace pour le développement d'essais dans les domaines de la physique et de la nanotechnologie. En tant qu'application avancée de la manipulation cellulaire, les pinces optiques ont facilité l'étude d'une multitude d'interactions cellulaires et moléculaires dans le domaine plus vaste de la nanotechnologie. Au cours des trois décennies qui ont suivi la montée en puissance des pinces optiques, des tests différents et polyvalents ont vu le jour qui explorent davantage les voies biochimiques essentielles à la prolifération et à la communication cellulaire. L'organe le plus critique impliqué dans la communication et la protection des cellules individuelles comprend la membrane plasmique. Au cours des trois dernières décennies, de nouveaux tests ont vu le jour qui examinent le rôle de la membrane plasmique dans l'interaction cellule à cellule et les composants protéiques spécifiques qui remplissent les fonctions membranaires intégrales de la cellule dans son ensemble. Pour mieux comprendre dans quelle mesure les pinces optiques ont évolué en tant qu'outil essentiel pour l'évaluation de la membrane cellulaire dans le domaine de la nanotechnologie, les divers nouveaux tests, notamment les tests de traction, d'indentation et d'étirement, seront examinés dans le secteur de recherche.

Mots-clés : pincettes optiques ; nanotechnologie ; interaction membranaire ; tests de tirage ; tests d'indentation ; tests d'étirement



Citation : Eechampati, A. ; de Silva, C.

Utilisation de la nanotechnologie
des pinces optiques dans les
études d'interaction membranaire. Appl.
Nano2022, 3, 43–53. <https://doi.org/10.3390/applnano3010004>

Rédacteurs académiques : Angelo
Maria Taglietti et Ilaria Rea

Reçu : 1er septembre 2021

Accepté : 14 janvier 2022

Publié : 7 février 2022

Note de l'éditeur : MDPI reste neutre en ce qui
concerne les revendications juridiques dans
les cartes publiées et les affiliations institutionnelles.
iations.



Copyright : © 2022 par les auteurs.
Licencié MDPI, Bâle, Suisse.

Cet article est un article en libre accès
distribué selon les termes et
conditions des Creative Commons

Licence d'attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Les pinces optiques, également connues sous le nom de pièges optiques, sont un outil exceptionnellement utile pour la manipulation non invasive et précise d'objets microscopiques allant des protéines attachées aux billes optiques en passant par les cellules multicellulaires eucaryotes [1]. En plus de cette remarquable plasticité dans la manipulation de la taille, les pinces optiques peuvent manipuler une multitude d'objets différents. Des composants cellulaires aussi petits que des protéines et de l'ADN peuvent être manipulés en attachant des billes de verre piégées optiquement, tandis que des objets aussi grands que des agrégats cellulaires peuvent être manipulés sans billes. Les pinces optiques ont été initialement inventées par Arthur Ashkin, dont les recherches fondamentales sur les pièges à gradient à faisceau unique ont jeté les bases des progrès réalisés au cours des 30 dernières années. Les travaux d'Ashkin sur le piège à gradient à faisceau unique ont démontré comment des lentilles convergentes pourraient faciliter l'étude des espèces biologiques microscopiques [2]. Les pinces optiques fonctionnent en utilisant un ensemble de lasers focalisés pour maintenir un objet en place, comme le montre la figure 1. Cette manipulation est effectuée par des forces opposées appliquées à l'objet sur différents côtés, maintenant ainsi l'objet statique dans l'espace [1]. Deux forces opposées impliquées dans cette manipulation comprennent les forces de diffusion/absorption et de gradient. La force de diffusion/absorption pointe dans la direction du faisceau principal et a tendance à déstabiliser le piège au-delà de la force de gradient. La force du gradient est proportionnelle à l'intensité du laser et pointe vers le point focal du piège. Pour que le piège reste stabilisé, la somme des forces de gradient doit être supérieure à la force de diffusion/absorption [1]. En tant que telles, les diverses fonctions du modèle de pince optique sont applicables à une multitude de sous-domaines de la nanotechnologie. Dans un cadre plus large, le modèle de base pour les pinces optiques est réalisé par un laser infrarouge projeté sur une série de miroirs qui réfléchissent le laser dans une série de lentilles de focalisation. Le laser se reflète ensuite sur un autre miroir.

Figure 1. Schéma d'une pince optique. Cette configuration de pince optique présente le conventionnel standard pour les tests de piégeage optique, qui sont généralement effectués en conjonction avec un Nikon caméra ainsi que des lampes au mercure et halogènes [1]. Reproduit avec la permission de Réf. [1].

Copyright © 2022 Springer Nature Suisse SA. Fait partie de Springer Nature.

1.1. Interaction holistique des membranes

Le facteur causal le plus répandu pour la myriade de tests dérivés de l'état basal de la pince optique comprend les études d'interaction membranaire. Ces études englobent une large base d'étude dans laquelle deux cellules peuvent être placées l'une près de l'autre pour évaluer leurs effets sur leurs membranes, ou une seule membrane d'une cellule peut être étudiée pour déterminer ses mesures de force. De plus, des stimuli externes, tels que des molécules polaires, peuvent être appliqués pour déterminer leurs effets sur certains canaux protéiques membranaires. De telles études ont également des implications sur les messagers secondaires et d'autres voies biochimiques. Les études sur la membrane offrent la possibilité d'explorer de nombreux tests de piégeage optique différents, provenant principalement de la composition complexe et complexe de la membrane cellulaire. Les tests de traction peuvent être introduits en appliquant une attache sur un aspect de la membrane cellulaire. Si deux attaches sont appliquées aux extrémités opposées de la cellule, des tests d'étirement peuvent être appliqués pour tester l'élasticité de la membrane ou de la cellule dans son ensemble. De plus, des particules diélectriques peuvent être utilisées pour introduire des tests d'indentation, dans lesquels une partie de la membrane cellulaire est poussée vers le bas, ce qui constitue un autre mode de mesure de l'élasticité de la membrane cellulaire. Cette section vise à illustrer la variété de tests résultant d'études sur les interactions membranaires et leurs implications dans la création de nouveaux tests centrés sur la théorie des pincettes optiques.

Avant l'avènement des pinces optiques dans les études sur les interactions membranaires, l'excitation membranaire était citée comme précurseur et jetait les bases des manipulations complètes du corps cellulaire. À l'origine, Ashkin utilisait la pression de rayonnement des lasers pour exciter des particules de taille micrométrique. En explorant l'effet de la pression des radiations sur le mouvement et le piégeage des particules, Ashkin émettait l'hypothèse que l'accélération et le piégeage d'une particule dépendent des transitions optiques [7]. En développant son hypothèse pour des études ultérieures, Ashkin a utilisé des études d'excitation membranaire pour exciter les microparticules et déterminer leur effet sur la fonction des particules macroscopiques [4]. En tant que tel, des études futures, telles que celles menées par Bar-Ziv et al., ont utilisé des lasers optiques pour exciter la bicouche lipidique, entraînant des modifications de fonction. En initiant des instabilités dynamiques, la bicouche lipidique remplissait des fonctions allant de l'exocytose aux ruptures au sein de la membrane [8].

L'une des difficultés majeures liées à l'utilisation de pinces optiques consiste à manipuler de manière adéquate et sûre l'échantillon d'intérêt tout en limitant les effets des lasers à haut rendement. Ashkin a utilisé un nouveau laser optique à atomes CW en 2004, qui utilisait le refroidissement par évaporation pour condenser les atomes dans le piège. Le nouveau laser a ainsi facilité l'étude de l'interaction membranaire en conservant l'échantillon d'intérêt [9]. De telles études incluent l'examen des effets des forces appliquées à la membrane et de leur effet cumulatif sur la fonction. Une étude menée par Sorre et al. a examiné l'effet des mesures de force sur la fonction de tri des lipides. En utilisant des pinces optiques pour mesurer la force nécessaire pour agir sur la membrane, les résultats de l'étude ont montré que le comportement des lipides à l'intérieur de la membrane cellulaire est augmenté par la présence de protéines regroupant les lipides et par la présence d'une forte concentration de lipides dans un milieu particulier. section de la membrane [10]. De la même manière, des modifications de la tension membranaire peuvent entraîner des modifications de la motilité cellulaire [11].

Lors de l'étude de l'interaction membranaire avec des pinces optiques, la matrice extracellulaire est une structure cellulaire essentielle. La matrice extracellulaire est un squelette externe de composants protéiques qui aident la cellule à adhérer, à transporter, à communiquer et à se protéger. Afin d'étudier plus en profondeur la fonction de la matrice extracellulaire, les études réalisées par Sheetz et al. ont utilisé des récepteurs de liaison au ligand pour identifier certaines zones d'attache afin d'évaluer la résistance de la matrice et de quantifier sa plasticité dans les mesures de force [12]. Ce protocole est également impliqué dans la mesure de la force des liaisons. Les mesures ultérieures comprennent l'évaluation du ligand et de la liaison moléculaire [12]. Cette étude met également en évidence de nombreux tests de piégeage optique critiques pour mesurer les propriétés mécaniques des cellules. L'un de ces tests comprend la nanoindentation, par laquelle une particule diélectrique est utilisée dans un test de motilité optique pour indenter une partie d'une membrane cellulaire [12]. Un autre test qui évalue davantage l'élasticité d'une cellule ou de ses composants subcellulaires comprend l'application d'un test d'étirement [12]. En appliquant un laser optique de faible intensité à une cellule maintenue dans un piège optique, des mesures de déplacement de force peuvent être prises pour

l'élasticité de cette partie particulière de la cellule. Dans le contexte de cet article de synthèse, des tests d'étirement peuvent être appliqués aux membranes pour évaluer leur élasticité. De tels tests d'étirement peuvent également être appliqués à différents organismes unicellulaires tels que des bactéries qui présentent une paroi cellulaire de peptidoglycane ou de lipopolysaccharides. Un autre élément essentiel des tests de piégeage optique comprend une extension d'attache. Les extensions Tether offrent une multitude d'applications différentes aux pièges optiques, principalement dans le domaine des études sur les interactions membranaires. Les attaches peuvent être induites spontanément par la cellule étudiée ou artificiellement [12]. Les attaches ont été utilisées en y attachant des billes piégées optiquement afin d'identifier un effet plus précis sur la membrane cellulaire d'intérêt. Plus précisément, les attaches peuvent être attachées à des récepteurs ou à des aspects spécifiques de la matrice extracellulaire et peuvent ensuite être utilisées pour appliquer une force de traction sur la membrane. Une étude examinant l'effet de la tension de la membrane plasmique sur la motilité cellulaire a utilisé une perle piégée optiquement attachée à une attache membranaire pour guider l'élasticité de la membrane cellulaire. Les résultats de l'étude ont montré que la tension de la membrane plasmique est inversement liée à la motilité cellulaire et qu'un seuil de tension de la membrane plasmique détermine donc si une cellule peut afficher de la motilité (13). En particulier, la tension de la membrane plasmique agit pour coordonner et diriger le mouvement de la cellule en régulant la polymérisation dans la direction d'intérêt [14]. L'interaction au niveau des organites comprend l'utilisation d'attaches membranaires pour étudier la coalescence des vésicules dans l'appareil de Golgi. En tirant une vésicule artificielle à travers une micropipette, la force de traction agissant sur les attaches a été observée et mesurée pour calculer le taux de coalescence [15].

Lors de l'examen d'une perspective microbiologique pour les pinces optiques, les bactéries unicellulaires ont été piégées optiquement et déplacées les unes vers les autres pour déterminer les mécanismes moléculaires derrière les membranes bactériennes [16]. La bactérie utilisée, *Bacillus subtilis*, est une bactérie à Gram positif dotée d'une paroi cellulaire exceptionnellement grande constituée de peptidoglycane. Le sucre peptidoglycane extracellulaire épais agit pour compenser le manque de composants extracellulaires présents dans les cellules d'ordre supérieur telles que les eucaryotes. Un piège optique a été utilisé pour maintenir une seule bactérie en place, tandis qu'un autre piège optique mobile retenait une bactérie amenée à proximité de l'organisme statique. Les déplacements ultérieurs des lasers aboutissant aux pièges optiques ont ensuite été traduits en mesures de force [16]. Le quorum sensing, un processus par lequel deux bactéries communiquent, a été conclu [16]. En effet, les mesures de force résultant du déplacement des lasers optiques montraient que les deux organismes bactériens signalaient qu'ils étaient trop proches l'un de l'autre. Cette configuration particulière de pincettes optiques est spécifiquement appelée pincettes optiques holographiques. Contrairement à la configuration de piège optique basal, les pinces optiques holographiques utilisent un modulateur spatial de lumière pour manipuler et contrôler simultanément deux pièges optiques. De plus, la puissance du laser pour cet essai a été réduite à 3 à 5 milliwatts pour éviter d'endommager les organismes modèles de bactéries. Afin d'éviter le chevauchement des deux lasers optiques, les pièges n'ont pas été rapprochés à moins de 1 micromètre l'un de l'autre. La totalité du test consistait à déplacer lentement l'un des pièges optiques vers l'état statique par pas de 200 à 500 nanomètres avant de se déplacer dans la direction opposée. Le processus total a duré 20 minutes, tandis que les mesures ont été prises toutes les 20 secondes [16]. Cette étude illustre que l'utilité des pinces optiques s'étend au-delà des interactions ligand-récepteur et peut quantifier les effets des molécules de signalisation sur une cohorte d'organismes.

Lors de l'examen des effets du paludisme sur les érythrocytes, des pinces optiques ont été utilisées pour explorer les effets du mérozoïte et du complexe érythrocytaire. Les mérozoïtes du paludisme sont impliqués dans l'invasion des globules rouges et prolifèrent rapidement dans tout le corps. Dans cette étude, le mérozoïte du paludisme a été piégé optiquement et déplacé à proximité d'un globule rouge piégé optiquement [17]. Placé à proximité de l'érythrocyte, le mérozoïte commence à subir des déformations membranaires caractéristiques de son potentiel invasif. En outre, pour examiner les tests de pièges mobiles et les effets de la proximité sur les interactions membranaires cellulaires, les effets du mérozoïte sur la composition de la membrane érythrocytaire ont été examinés après que la cible invasive se soit attachée au globule rouge. En utilisant des pinces optiques pour étudier les membranes attachées, des mesures de force ont été dérivées de

examens de la liaison du mérozoïte et de la déformation des érythrocytes [17]. L'étude utilise davantage des pincettes optiques en étudiant les effets d'un inhibiteur connu de l'invasion des mérozoïtes dans un globule rouge. L'inhibiteur connu utilisé était l'héparine qui agit en empêchant le mérozoïte de se fixer aux globules rouges. Le résultat de l'inhibiteur appliqué a montré une diminution statistiquement significative de la force de détachement par rapport au type sauvage, ce qui conduit à l'implication de l'héparine dans la réduction de l'attachement et du détachement du mérozoïte [17].

La totalité de cette étude illustre la polyvalence des pinces optiques dans une multitude de tests différents. Des pinces optiques ont également été utilisées pour induire des déformations dans les érythrocytes. Des études sur la déformation induite démontrent comment des pinces optiques peuvent être utilisées pour étudier les propriétés viscoélastiques des érythrocytes [18]. Les variations ultérieures des tests de piégeage optique et de motilité ont permis d'examiner les effets du mérozoïte à partir du point de proximité, du point de déformations préinvasives du mérozoïte, des déformations ultérieures des globules rouges dues à l'invasion du mérozoïte et d'une analyse approfondie. compréhension du mécanisme par lequel l'inhibiteur du mérozoïte, l'héparine, agit pour freiner la déformation des globules rouges.

Un autre composant cellulaire essentiel qui constitue un aspect important des interactions membranaires comprend le mécanisme par lequel elles fusionnent. Les protéines SNARE ou récepteurs solubles de la protéine d'attachement au facteur sensible au N-éthylmaléimide agissent pour attacher les membranes cellulaires ensemble et, par un mouvement semblable à une fermeture éclair, forcent les deux membranes à fusionner en les rapprochant [19]. A ce titre, la fusion de vésicules à travers le complexe SNARE constitue un domaine d'étude exceptionnel. Cependant, les efforts récents visant à modéliser l'énergétique du complexe SNARE ont été extrêmement difficiles à quantifier. Ainsi, des pinces optiques ont été utilisées pour calculer les mesures liées à la force entourant la fusion des vésicules à travers le complexe SNARE. Le complexe SNARE à bobine enroulée a été attaché à deux billes piégées optiquement. Un côté du complexe enroulé-bobine était attaché à un récepteur d'attache de biotine, tandis que l'autre était attaché à un ADN d'ancrage. L'ADN d'ancrage était attaché à la perle manipulée [19]. À partir de ce point, la force d'extension de la bobine enroulée pourrait être mesurée lorsqu'une force mécanique est appliquée à la bille liée à l'ADN [19]. Cette étude illustre l'utilité d'un simple test de traction optique pour déterminer des mesures biochimiques plus fines associées aux interactions membrane à membrane.

1.2. Essais de traction

Comme le montre l'étude portant sur la mécanique complexe du SNARE, les essais de traction jouent un rôle essentiel dans les études sur les membranes. En particulier, les études membranaires centrées sur la fixation d'une perle optique mobile à une partie de la membrane ou du cytosquelette fournissent une ancre suffisante pour tester l'élasticité de la membrane. Étant donné que l'élasticité de la membrane est liée à la fonction cellulaire, les tests de traction peuvent aider à mieux découvrir les mécanismes derrière certaines fonctions biochimiques. Une étude a examiné la relation entre l'élasticité cellulaire et la régulation de la fonction des macrophages et des différentes cellules qui composent le système immunitaire [20]. Une seule configuration de pince optique standard a été utilisée avec l'ajout d'une perle optique mobile liée à la cellule de la membrane de l'objet d'intérêt. Une lame de verre a été recouverte de 5×10^4 cellules d'intérêt. Des billes de polystyrène non revêtues ont ensuite été placées sur les lamelles et manipulées avec une pince optique. La pince optique a capturé chaque perle et l'a maintenue près de la cellule d'intérêt pendant 5 secondes pour permettre la formation d'une attache membranaire appropriée. Les forces de Van der Waal sont probablement impliquées dans la formation de ces attaches [20]. Après la formation du lien entre la cellule et la perle, les tests de traction conventionnels utilisent la perle piégée optiquement pour calculer les mesures de force entourant la traction de la membrane. Une autre étude a examiné les effets d'un test de traction sur une cellule HeLa, comme le montre la figure 2. Une cellule HeLa est une cellule cancéreuse immortelle utilisée dans des études scientifiques. Cette étude particulière visait à examiner les détails les plus fins de l'étirement de la membrane cellulaire [21]. Une bille recouverte de lectine qui formait un lien avec la cellule HeLa leur a permis de mesurer les forces entourant la flexion de la membrane [21].

Un domaine d'étude important concernant les tests de traction comprend les études de tension membranaire. Lorsque les cellules subissent une exocytose, une partie de leur membrane bouillonne et forme un

étirements [21]. Une bille recouverte de lectine qui formait un lien avec la cellule HeLa leur a permis de mesurer les forces entourant la flexion de la membrane [21].

Un domaine d'étude important concernant les tests de traction comprend les études sur la tension

membranaire. Lorsque les cellules subissent une exocytose, une partie de leur membrane bouillonne et forme une vésicule indépendante. De nombreuses études examinent les effets de la tension lors de l'exocytose cellulaire. Comme vésicule indépendante. De nombreuses études examinent les effets de la tension lors de l'exocytose cellulaire. Comme avec d'autres tests de traction, les billes enrobées sont attachées à une attache qui se connecte à un élément particulier grande partie de la membrane cellulaire. Ensuite, des pincettes optiques sont utilisées pour extraire dix sections de la membrane cellulaire. Par la suite, des pincettes optiques sont utilisées pour tirer la tension à travers le point d'exocytose [22]. Dans les études examinant la morphologie de la membrane plasmique jusqu'au point d'exocytose [22]. Dans les études examinant la morphologie de la membrane plasmique jusqu'au point d'exocytose, une capture à plus haute résolution est nécessaire. En tant que telle, la simulation de la microscopie à déplétion d'émission (STED), peut être utilisée avec le piège optique pour la microscopie à déplétion de capuchon (STED), peut être utilisée avec le piège optique pour capturer une image à haute résolution [23]. Une visualisation plus claire de l'interaction membranaire peut également être effectuée par des applications de fluorescence suivies d'une électroporation, ou le processus de débordement d'augmenter délibérément la perméabilité de la membrane cellulaire [23]. Lorsqu'il en faut moins, on augmente la perméabilité de la membrane cellulaire [23]. Lors d'un tel test, les méthodes moins précises des méthodes précises d'essais de traction, les transducteurs de force magnétique constituent une solution efficace. Pour les essais de traction, les transducteurs de force magnétique constituent un remplacement efficace des essais optiques. Tout en utilisant des transducteurs de force magnétique, une pince à épiler. Lors de l'utilisation de transducteurs de force magnétique, une pince paramagnétique est attachée à la pince à épiler. La pince magnétique est attachée à la bicouche phospholipidique de la membrane cellulaire, et la tension est appliquée par un électroaimant monté [24]. Cependant, la procédure standard est la meilleure dans les études montrées dans les études réalisées par les pincettes optiques, les billes enrobées sont utilisées, réalisées mesurant la viscosité de la membrane des cellules vivantes en tirant sur les attaches connectées à la viscosité membranaire, ce qui permet des mesures plus précises [23].

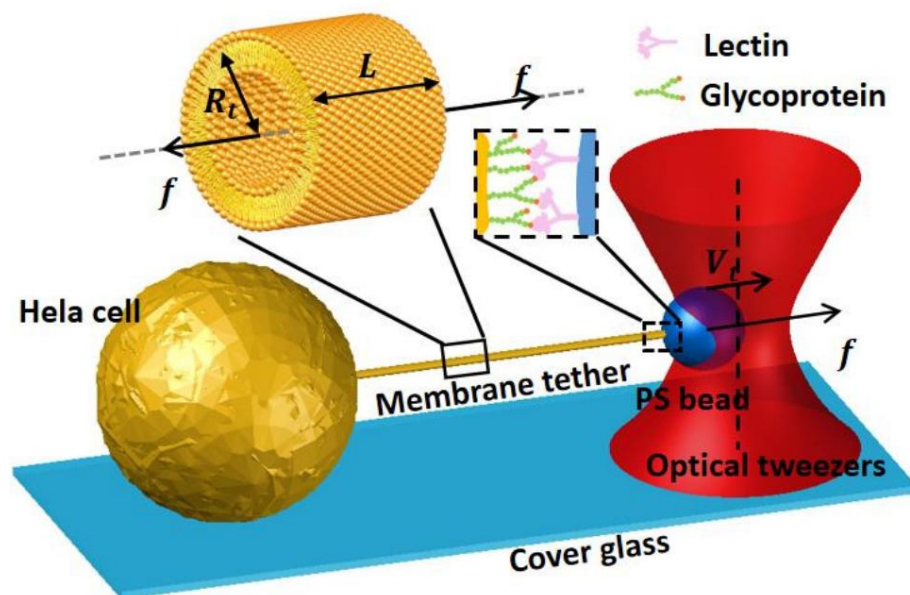


Figure 22. Test de traction de pince optique. Une bille de polystyrène liée à la lectine est attachée à la membrane d'une cellule HeLa pour évaluer la tension membranaire. Les glycoprotéines sont placées sur la membrane et manipulées par des pincettes optiques. La force d'étirement appliquée à la bicouche phospholipidique est mesurée [21].

Reproduit avec la permission de Réf. [21]. Droits d'auteur © 2021 Presses universitaires d'Oxford.

1.3. Tests d'indentation 1.3.

Tests d'indentation

De la même manière que les tests de traction, les tests d'indentation utilisent également un capteur optiquement piégé. Une bille de polystyrène est attachée à la membrane cellulaire. Cependant, au lieu de tirer sur la perle, il s'agit d'imposer une force sur la membrane cellulaire. Cependant, contrairement aux analyses par extraction de la membrane, les tests d'indentation sont utilisés pour mesurer les forces liées à la poussée vers le bas ou à l'indentation de la membrane cellulaire. Dans une étude examinant l'efficacité de l'indentation cellulaire de la membrane cellulaire, un laser optique est classiquement configuré avec des lentilles focales similaires et un Nikon. Un laser optique est classiquement configuré avec des lentilles focales similaires et un appareil photo Nikon. Cependant, au lieu d'utiliser une bille mobile et un seul piège optique, l'efficacité est obtenue.

L'efficacité des tests d'indentation dans une perle piégée optiquement a été examinée lors de l'utilisation de tests d'indentation dans une perle piégée optiquement [26]. Plus précisément, la perle piégée optiquement est une pince à épiler pour manipuler la cellule [26]. Plus précisément, la perle piégée optiquement est placée sur la cellule, et aucun contact n'est assuré. La cellule est ensuite déplacée vers la cellule, et aucun contact n'est assuré. La cellule est ensuite déplacée vers la cellule, et aucun contact n'est assuré.

À mesure que la cellule se rapproche, la perle commence à sortir de son état piégé. Le

le déplacement parcouru par la bille peut alors être mesuré et quantifié [26]. Comme représenté sur la

Figure 3a. Dans cette étude, le déplacement du cordon a été mesuré pour calculer l'élasticité module de la membrane cellulaire. Dans une étude similaire réalisée par le même auteur principal, le

vers la perle. À mesure que la cellule se rapproche, la perle commence à sortir de son état piégé. Le déplacement parcouru par la bille peut alors être mesuré et quantifié [26].

Comme le montre la figure 3a, Dans cette étude, le déplacement de la bille a été mesuré pour calculer le module

[illegible]

les types.

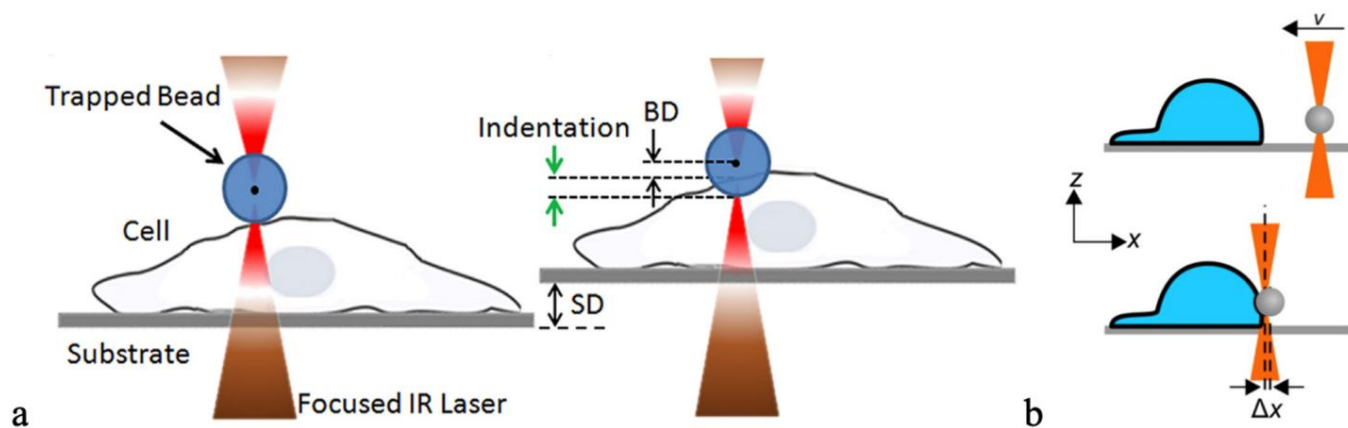


Figure 3. (a) test d'indentation conventionnel : une cellule est manipulée verticalement dans un piège optique. (b) test d'indentation latérale : une cellule est manipulée verticalement dans un piège optique. Le déplacement de la bille piégée optiquement fournit des mesures de force [26].

Réf. [30]

Réf. [30]

variation significative du test classique à la pince est le test d'étirement. Comme 1.4. Essais d'étirement

illustré à la figure 4. Les tests d'étirement utilisent généralement deux pièges optiques aux deux extrémités d'un test d'étirement. Une variation significative du test à la pince classique est le test d'étirement. Comme objet d'intérêt avant de l'étirer. Les tests d'étirement suivent une méthodologie similaire illustrée à la figure 4. Les tests d'étirement utilisent généralement deux pièges optiques aux deux extrémités d'un test d'étirement, à l'exception du fait que la plupart des tests d'étirement sont appliqués conjointement à l'objet d'intérêt avant de l'étirer. Les tests d'étirement suivent une méthodologie similaire

aux tests de traction, à l'exception du fait que la plupart des tests d'étirement sont appliqués conjointement avec un autre test optique mobile ou sont effectués par étapes. Pour une étude

En étudiant la fluidité membranaire des cellules cancéreuses du poumon, cette dernière est utilisée. Dans cette étude, la cellule a été transfectée avec différents niveaux de virulence à l'aide d'un micro-ARN. Une série de des tests successifs d'étirement de la membrane sur chacune des cellules ont ensuite été effectués

avec un autre test optique mobile ou sont effectués par étapes. Pour une étude

En étudiant la fluidité membranaire des cellules cancéreuses du poumon, cette dernière est utilisée. Dans cette étude, la cellule a été transfectée avec différents niveaux de virulence à l'aide d'un micro-ARN. Une série de tests successifs d'étirement de la membrane sur chacune des cellules a ensuite été réalisée pour découvrir une

corrélation entre la transfection de micro-ARN et la fluidité membranaire (32). pour découvrir une corrélation entre la distorsion de la membrane cellulaire indiquait si le microARN en avait. La distorsion de la membrane cellulaire effets sur la cellule. Dans une étude examinant les effets d'un test d'étirement utilisant une double optique, les

pièges optiques ont été utilisés pour les échantillons adhésifs piégés dans les microfluidiques (33). Dans les études (38) les forces d'étirement quantifiées pour évaluer l'élasticité de la membrane d'une cellule bactérienne. Cette variation du test d'étirement concerne également l'analyse de la membrane des cellules de sang. Un autre modèle de test d'étirement des tests d'étirement d'identité de la cellule des piéges optiques dans les échantillons de globules rouges. À cause des cellules sanguines. Étant donné que les globules rouges n'ont pas de noyau ni de membrane, les globules rouges constituent les seuls échantillons viables sans interférence minimale de la distorsion d'une pince optique. L'analyse optique des globules rouges permet d'étudier les propriétés des globules rouges par des piéges optiques et d'étudier les propriétés des globules rouges pour examiner les déformations qu'ils peuvent atteindre. Dans la cellule peut réaliser. Dans le cas d'un globe rouge piégé à l'extrémité d'un double faisceau, les tests de piéges optiques par des globules rouges ont été réalisés. Les piéges optiques des globules rouges sont déplacés dans des directions visuelles pour visualiser les déformations résultantes du globe rouge (34). Piégeage optique à double faisceau. Les tests de piéges optiques des globules rouges sont également appliqués aux milieux cliniques. Cette étude a examiné la déformabilité des globules rouges de patients diabétiques de type 2 (35). En tant que tel, les tests d'étirement sont des outils exceptionnellement utiles pour examiner les globules rouges dans un

paramètre.

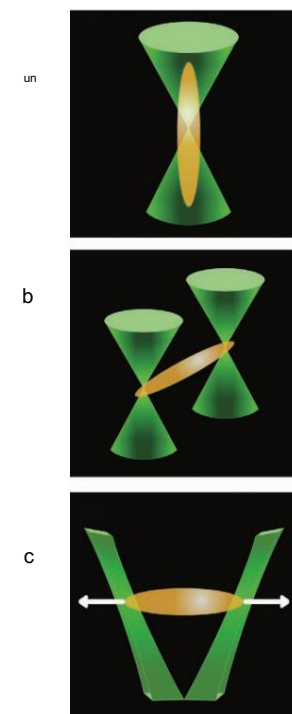


Figure 4. Exemples d'essais d'étirement optique. (a) Test d'étirement utilisant un seul piège optique. (b) Un test d'étirement à double piège optique. (c) Test d'étirement utilisant un double piège optique avec (b) Un test d'étirement à double piège optique. (c) Test d'étirement utilisant un double piège optique avec projections de forces latérales [33]. Réimprimé de Réf. [33].

1.5. Études sur la composition des membranes

Les aspects essentiels de la pince optique sont la manipulation de cellules et de matériaux. Les caractéristiques des pinces optiques permettent la manipulation des membranes des cellules, en tant que base de valeurs de rigidité et de force, déterminer la composition de la membrane. Une étude de chambre microfluidique a été utilisée pour manipuler des cellules dans une chambre microfluidique a tiré parti de la capacité de la pince optique à détecter les mesures de force et de déplacement pour manipuler, émettre une fluorescence et catégoriser les cellules entrées. la chambre [36]. Une autre étude a utilisé les déplacements de forces mécaniques des billes dans des tests de piégeage pour catégoriser la composition biochimique et déterminer l'identité d'un

cellule particulière [37]. Ces deux études examinent les éléments mécaniques de la membrane cellulaire pour déterminer la classification de la cellule. Cependant, d'autres études examinent comment les données et méthodologies antérieures peuvent être utilisées pour identifier certaines cellules grâce à des pinces optiques. Une étude décrivant les protocoles d'étude des globules rouges cite des tests confirmant le manque d'organites et la plasticité dans laquelle les globules rouges peuvent confirmer comme un outil adéquat de caractérisation [38]. Alors que la majorité des études actuelles sur l'interaction et la composition des membranes explorent les facettes extracellulaires qui déterminent une cellule, d'autres études qui explorent la théorie de la rhéologie utilisent des pinces optiques pour étudier la composition du côté cytosolique de la membrane. Une étude utilisant la biomimétique a créé un liposome qui agit comme une membrane cellulaire entourant le piège optique [39]. La composition de la membrane peut également être modifiée en augmentant la concentration en protéines dans une seule partie de la membrane, entraînant des changements morphologiques tels que la courbure (40). Les études sur la composition des membranes constituent une voie moins explorée des études membranaires utilisant des pincettes optiques ; cependant, l'émergence de nouveaux tests fait progresser l'étude de cette sous-discipline.

2. Conclusions

Au cours des trois dernières décennies, les progrès dans le domaine de la nanotechnologie ont été renforcés par l'avènement des pincettes optiques et du test de base du piège optique. Les études antérieures sur l'interaction membranaire et la dynamique de la matrice extracellulaire se limitaient en grande partie à des estimations. Cependant, depuis l'émergence et la progression du piège optique, la dynamique des forces peut être quantifiée avec précision. La base principale du piège optique retient la plasticité inhérente de son fonctionnement, ce qui permet la manipulation de différents échantillons, depuis les cellules eucaryotes jusqu'à la double hélice d'ADN. Cette plasticité facilite également des ajouts plus fins à la fonction du piège optique, ce qui entraîne des tests de déplacement, de traction, d'étirement et d'indentation tout en conservant la possibilité d'ajustements supplémentaires et de nouveaux tests ultérieurs. Dans le domaine des études génériques sur les interactions membranaires, les attaches et les particules diélectriques peuvent être utilisées pour déterminer les mesures de force d'une myriade de types de membranes extracellulaires. L'utilisation présente dans la catégorie plus large des interactions membranaires démontre comment les progrès nanotechnologiques ne se limitent pas à un seul protocole ou test. De futurs progrès à des échelles encore plus fines que celle de l'interaction membranaire, c'est-à-dire la détermination de la fonction des protéines membranaires, sont une possibilité si l'on considère les avancées actuelles résultant du piège optique. Un tel réglage fin est représenté dans les essais de traction, qui modifient le piège optique de base pour déterminer les mesures de force par déplacement d'une bille attachée.

La modalité des divers tests optiques est influencée par le sujet de niche d'étude. Dans un contexte dans lequel le module d'élasticité est spécifiquement destiné à être mesuré, des tests d'indentation peuvent être utilisés pour déterminer des mesures de force entourant la membrane cellulaire. Bien qu'il ne soit pas aussi polyvalent ni aussi complet que le test de traction, le test d'indentation démontre comment le modèle de base du piège optique peut être modifié pour remplir une certaine fonction. Une autre démonstration de la fonctionnalité spécifique du piège optique est également représentée dans les tests d'étirement, qui se limitent principalement aux études de distorsion de la membrane. Étant donné que la plupart des cellules contiennent des organites qui empêchent les calculs de force des tests d'étirement, les tests de distorsion membranaire qui examinent le résultat phénotypique de la transduction sont des expériences intéressantes. En résumé, la polyvalence et la fonctionnalité exceptionnelles des pinces optiques représentent une marque d'innovation dans le domaine de la nanotechnologie. En facilitant l'étude des déplacements de force des structures des cellules vers l'ADN, les pinces optiques s'avéreront inestimables pour l'étude de futurs sujets à l'échelle nanométrique et serviront de modèle de base pour progresser dans le secteur de recherche actuel.

Contributions des auteurs : rédigées par AE et CdS. Tous les auteurs ont lu et accepté la version publiée du manuscrit.

Financement : Financement par l'Université Mercer.

Déclaration du comité d'examen institutionnel : sans objet.

Déclaration de consentement éclairé : sans objet.

Déclaration de disponibilité des données : sans objet.

Conflits d'intérêts : Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

Les références

- Guo, HL; Li, ZY Technique des pinces optiques et ses applications. *Sci. Chine Phys. Mécanique. Astrone.* 2013, 56, 2351-2360. [\[Référence croisée\]](#)
- Ashkin, A. Forces d'un piège laser à gradient à faisceau unique sur une sphère diélectrique dans le régime optique des rayons. *Biophysique. J.* 1992, 61, 569-582. [\[Référence croisée\]](#)
- Nussenzeig, HM Biophysique des membranes cellulaires avec une pince optique. *EUR. Biophysique. J.* 2017, 47, 499-514. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Ashkin, A. Piégeage optique et manipulation de particules neutres à l'aide de lasers. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 1997, 94, 4853-4860. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Zhang, H. ; Kuo-Kang, L. Pincettes optiques pour cellules uniques. *JR Soc. Interface* 2008, 5, 671-690. [\[Référence croisée\]](#) 6. Moffitt, JR; Chemla, YR ; Smith, SB; Bustamante, C. Progrès récents dans les pincettes optiques. *Ann. Rév. Biochem.* 2008, 77, 205-228. [\[Référence croisée\]](#)
- Ashkin, A. Accélération et piégeage des particules par pression de rayonnement. *Phys. Le révérend Lett.* 1969, 24, 156-159. [\[Référence croisée\]](#) 8. Bar-Ziv, R. ; Moïse, E. ; Nelson, P. Excitations dynamiques dans les membranes induites par des pincettes optiques. *Biophysique. J.* 1998, 75, 294-320. [\[Référence croisée\]](#)
- Ashkin, A. Conception d'un laser atomique optique CW. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 2004, 101, 12108-12113. [\[Référence croisée\]](#)
- Sorre, B. ; Callan-Jones, A. ; Manneville, J.-B. ; Nassoy, P. ; Joanny, J.-F. ; Prost, J. ; Goud, B. ; Bassereau, P. Le tri des lipides basé sur la courbure nécessite une proximité avec un point de démixtion et est aidé par des protéines. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 2009, 106, 5622-5626. [\[Référence croisée\]](#)
- Gauthier, Caroline du Nord ; Fardin, MA; Roca-Cusachs, P. ; Sheetz, député L'augmentation temporaire de la tension de la membrane plasmique coordonne l'activation de l'exocytose et de la contraction pendant la propagation cellulaire. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 2011, 108, 14467-14472. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Arbore, C. ; Perego, L. ; Sergides, M. ; Capitanio, M. Sonder la force dans les cellules vivantes avec une pince optique : de la mécanique des molécules uniques à la mécanotransduction cellulaire. *Biophysique. Rév.* 2019, 11, 765-782. [\[Référence croisée\]](#)
- Batchelder, EL ; Hollopeter, G. ; Campillo, C. ; Mézanges, X. ; Jorgensen, EM; Nassoy, P. ; Sens, P. ; Plastino, J. La tension membranaire régule la motilité en contrôlant l'organisation des Lamellipodium. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 2011, 108, 11429-11434. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Cuvelier, D. ; Derényi, I. ; Bassereau, P. ; Nassoy, P. Coalescence des attaches membranaires : expériences, théorie et applications. *Biophysique. J.* 2005, 88, 2714-2726. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Hénon, S. ; Lenormand, G. ; Richert, A. ; Gallet, F. Une nouvelle détermination du module de cisaillement des érythrocytes humains Membrane utilisant une pince à épiler optique. *Biophysique. J.* 1999, 76, 1145-1151. [\[Référence croisée\]](#)
- Dienerowitz, M. ; Cowan, LV ; Gibson, directeur général ; Foin, R. ; Padgett, MJ; Phoenix, VR, des paires de bactéries piégées optiquement révèlent une réponse mobile discrète pour contrôler l'agrégation lors d'une approche cellule-cellule. *Curr. Microbiol.* 2014, 69, 669-674. [\[Référence croisée\]](#)
- Crick, AJ; Théron, M. ; Tiffert, T. ; Lew, VL; Cicuta, P. ; Rayner, JC Quantification des cellules-cellules érythrocytaires du parasite du paludisme Interactions à l'aide de pinces optiques. *Biophysique. J.* 2014, 107, 846-853. [\[Référence croisée\]](#)
- Dai, J. ; Michael, S. Formation d'attache membranaire à partir de cellules saignantes. *Biophysique. J.* 1999, 77, 3363-3370. [\[Référence croisée\]](#)
- Zhang, Y. Énergétique, cinétique et voie de pliage et d'assemblage du SNARE révélés par des pincettes optiques. *Protéine Sci.* 2017, 26, 1252-1265. [\[Référence croisée\]](#)
- Pontes, B. ; Ayala, Y. ; da Fonseca, ACC; Romão, LF ; Amaral, RF; Salgado, LT; Lima, FRS ; Farina, M. ; Viana, Nouveau-Brunswick; Moura-Neto, V. ; et coll. Propriétés élastiques de la membrane et fonction cellulaire. *PLoS ONE* 2013, 8, e67708. [\[Référence croisée\]](#)
- Li, X. ; Liu, X. ; Chanson, X. ; Li, Y. ; Li, M. ; Wang, H. Mesure de la mécanosensation membranaire dynamique à l'aide d'une pince optique. *J. Mol. Biol. cellulaire.* 2021, 13, 455-457. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Roy, D. ; Steinkühler, J. ; Zhao, Z. ; Lipowsky, R. ; Dimova, R. La tension mécanique des biomembranes peut être mesurée par microscopie à super résolution (STED) de nanotubes induits par force. *Nano Lett.* 2020, 20, 3185-3191. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Dasgupta, R. ; Miettinen, MS; Fricke, N. ; Lipowsky, R. ; Dimova, R. Le glycolipide GM1 remodèle les biomembranes asymétriques et les vésicules géantes par génération de courbure. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 2018, 115, 5756-5761. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Heinrich, V. ; Richard, W. Un transducteur de force Piconewton et son application à la mesure de la rigidité en flexion de Membranes phospholipidiques. *Anne. Bioméde. Ing.* 1996, 24, 595-605. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
- Li, Z. ; Anvari, B. ; Takashima, M. ; Brecht, P. ; Torres, JH; Brownell, Formation d'attache membranaire WE à partir de cellules ciliées externes avec une pince à épiler optique. *Biophysique. J.* 2002, 82, 1386-1395. [\[Référence croisée\]](#)
- Yousafzai, MS ; Ndoye, F. ; Coceano, G. ; Niemela, J. ; Bonin, S. ; Scoles, G. ; Cojoc, D. Élasticité cellulaire dépendante du substrat mesurée par indentation avec une pince optique. *Opt. Lasers Ing.* 2016, 76, 27-33. [\[Référence croisée\]](#)
- Yousafzai, MS ; Coceano, G. ; Bonin, S. ; Niemela, J. ; Scoles, G. ; Cojoc, D. Étude de l'effet du substrat cellulaire sur les cellules cancéreuses rigidité par pince optique. *J. Biomécanique.* 2017, 60, 266-269. [\[Référence croisée\]](#)
- Dimova, R. ; Poulligny, B. ; Dietrich, C. Effets prétransitionnels dans les membranes vésiculaires de dimyristoylphosphatidylcholine : étude de dynamométrie optique. *Biophysique. J.* 2000, 79, 340-356. [\[Référence croisée\]](#)

29. Ndoye, F. ; Yousafzai, MS ; Coceano, G. ; Bonin, S. ; Scoles, G. ; Ka, O. ; Niemela, J. ; Cojoc, D. L'influence des forces latérales sur la mesure de la rigidité cellulaire par indentation verticale avec une pince optique. *Int. J. Optoméchatron.* 2016, 10, 53-62. [\[Référence croisée\]](#)
30. Jokhadar, Z. ; Stojkovic, B. ; Vidak, M. ; Sorćan, T. ; Liovic, M. ; Gouveia, M. ; Travasso, RDM ; Derganc, J. Raideur corticale de kératinocytes mesurés par indentation latérale avec une pince optique. *PLoS ONE* 2020, 15, e0231606.
31. Zhu, C. ; Das, SL; Baumgart, T. Tri non linéaire, génération de courbure et encombrement de l'endophiline n-Bar sur tubulaire Membranes. *Biophysique. J.* 2012, 102, 1837-1845. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
32. Li, X. ; Chen, Z. ; Li, Y. ; Liang, H. ; Wang, H. ; Li, M. Étude de pincettes optiques sur la fluidité membranaire dans les cellules cancéreuses du poumon à petites cellules. *Opter. Express* 2021, 29, 11976. [\[CrossRef\]](#) [\[Pub Med\]](#)
33. Bezryadina, AS ; Préce, DC ; Chen, JC ; Chen, Z. Démontage optique des amas cellulaires par des pincettes réglables de « tir à la corde ». *Scie légère. Appl.* 2016, 5, e16158. [\[Référence croisée\]](#) [\[Pub Med\]](#)
34. Zhu, R. ; Avsievich, T. ; Popov, A. ; Meglinski, I. Pincettes optiques dans les études sur les globules rouges. *Cellules* 2020, 9, 545. [\[CrossRef\]](#)
35. Agrawal, R. ; Intelligent, T. ; Cardoso, JN; Richards, C. ; Bhatnagar, R. ; Tufail, A. ; Shima, D. ; Jones, PH ; Pavesio, C. Évaluation de la déformabilité des globules rouges dans le diabète sucré de type 2 et la rétinopathie diabétique par technique d'éirement à double pince optique. *Sci. Rapport* 2016, 6, SREP15873. [\[Référence croisée\]](#)
36. Landenberger, B. ; Höfemann, H. ; Wadle, S. ; Rohrbach, A. Tri microfluidique de cellules arbitraires avec une pince optique dynamique. *Puce de laboratoire* 2012, 12, 3177-3183. [\[Référence croisée\]](#)
37. Wu, Y. ; Soleil, D. ; Huang, W. Caractérisation de la force mécanique lors de la manipulation de cellules vivantes avec une pince optique. *J. Biomécanique.* 2011, 44, 741-746. [\[Référence croisée\]](#)
38. Sigüenza, J. ; Méndez, S. ; Nicoud, F. Comment utiliser l'expérience de la pince optique pour caractériser le globule rouge mécanique des membranes ? *Biomécanique. Modélisation du mécanobiol.* 2017, 16, 1645-1657. [\[Référence croisée\]](#)
39. Zhang, S. ; Gibson, LJ ; Stilgoe, Alberta; Nieminen, TA; Rubinshtein-Dunlop, H. Mesure des propriétés locales à l'intérieur d'une cellule imitant structure à l'aide d'une pince optique rotative. *J. Biophotonique* 2019, 12, e201900022. [\[Référence croisée\]](#)
40. Callan-Jones, A. ; Patricia, B. Distribution des lipides et des protéines membranaires basée sur la courbure. *Curr. Avis. Matériau à semi-conducteurs. Sci.* 2013, 17, 143-150. [\[Référence croisée\]](#)