

La microscopie optique en champ proche. Applications

J. Salvi, D. Van Labeke

Département d'Optique P.M. Duffieux, Institut FEMTO-ST
Université de Franche-Comté,
25030 Besançon Cedex, France

Introduction	2
1 Nanolithographie	3
2 Biologie	4
3 Microscopie de fluorescence et détection de molécule unique	6
4 Spectroscopie Raman	8
5 Photonique et nano-optique	9
5.1 Guides d'onde et SNOM interférométrique	10
5.2 Cavités et cristaux photoniques	12
5.3 Plasmonique	13
5.4 Métamatériaux et nanostructures métallo-diélectriques	16
6 Conclusion	17

Résumé

En balayant une sonde à quelques nanomètres de la surface de l'échantillon, la microscopie optique en champ proche permet d'atteindre des résolutions sub-longueur d'onde. La nano-caractérisation optique offre de nombreuses applications en physique, en biologie, en biochimie. . . Cet article répertorie les applications les plus fructueuses et les plus prometteuses de la microscopie optique en champ proche. Tout d'abord, la nano-sonde permet d'atteindre une résolution nanométrique pour la photolithographie. Il est également possible de détecter de faibles signaux optiques (fluorescence, spectroscopie Raman), de sonder des zones de l'espace très réduites (détection de molécule unique) et d'augmenter le rapport signal sur bruit par effet de pointe. Les microscopes champ proche ont également accompagné la révolution des nanotechnologies et les développements importants de la photonique et de la nano-optique.

Near-field optical microscopes ensure a sub-wavelength resolution by scanning a probe a few nanometres from the sample surface. Nanometer optical resolution can be fruitful in many applications, including physics, biology, biochemistry. . . This article identifies the most prolific and promising applications of near field optical microscopy. First,

nano-resolution is achievable in photolithography thanks to the nano-probe. Weak optical signals (fluorescence, Raman spectroscopy) can also be detected and it is possible to probe very small volume (single molecule detection). Moreover, the signal to noise ratio can be increased by tip effect. Near-field optical microscopes have also gone with the nanotechnologies revolution and the important spread of photonics and nano-optics.

Introduction

Les microscopes optiques en champ proche ont été inventés il y a un peu plus de trente ans et, après avoir diffusé vers l'industrie, ils sont aujourd'hui commercialisés par plusieurs compagnies sous différents acronymes (voir annuaire). Cependant, ils n'ont pas quitté pour autant les laboratoires de recherche car leur pouvoir de résolution offre un aperçu unique du comportement de la lumière à l'échelle sub-longueur d'onde. Leur principe réside dans le balayage d'une sonde locale à quelques nanomètres de la surface de l'échantillon. Cette sonde est le plus souvent une fibre optique étirée en pointe, métallisée ou non, avec ou sans ouverture et son rôle est de permettre la détection des ondes évanescentes confinées au voisinage immédiat de l'objet. Ces ondes évanescentes contiennent l'information liée aux détails les plus fins de l'objet et leur détection permet de dépasser le critère de Rayleigh et d'atteindre des résolutions sub-longueur d'onde. Il existe de nombreuses configurations de microscope champ proche optique, mais le principe en est toujours le même. Il est décrit plus en détail dans la référence [1].

Ces multiples configurations font des microscopes optiques champ proche un outil très polyvalent qui affiche de nombreuses applications en apportant une précision nanométrique aux techniques d'analyse optiques habituelles. Ainsi cet article répertorie-t-il quelques exemples d'applications parmi les plus fructueuses et les plus prometteuses. Cependant, cette liste est loin d'être exhaustive : de nombreuses autres existent ou sont en train de naître et chaque nouvelle application s'accompagne d'une configuration particulière de microscope champ proche plus ou moins originale et efficace (éclairage, détection, nature et forme de la sonde...). À noter que les sondes (ou nano-antennes) sont aujourd'hui l'objet d'une attention particulière en recherche pour améliorer leur pouvoir collecteur ou pour les fonctionnaliser (détection du champ magnétique, sensibilité à la polarisation...). Ces études dédiées à la conception des sondes et à leur applications spécifiques sont regroupées dans l'article [1].

Le présent article se concentre sur les applications de la microscopie optique en champ proche en physique, biologie, biochimie... La première application qui vient lorsque l'on dispose d'une nano-source (la sonde) est naturellement la photolithographie à haute résolution. C'est une application importante car toute l'industrie micro-électronique repose sur cette technique qui permet de fabriquer en masse les micro-circuits de l'électronique. C'est l'objet du premier chapitre. Le deuxième chapitre cite quelques exemples d'applications en biologie. En effet, l'utilisation d'un microscope optique en champ proche est peu invasive (pas de métallisation de l'objet, pas de contact avec la sonde) et c'est donc un outil permettant la caractérisation d'échantillons biologiques avec une résolution meilleure qu'en microscopie classique. Parmi les techniques optiques souvent utilisées en biochimie et biologie, les marqueurs fluorescents peuvent aussi être utilisés avec un microscope champ proche pour atteindre des résolutions sub-longueurs d'onde. L'apport de ces microscopes à la microscopie de fluorescence est décrit dans le chapitre 3. La taille nanométrique des sondes permet également d'examiner des volumes très réduit de l'échantillon et donc de faire de la spectroscopie de molécule unique. L'influence

de la sonde locale est également évoquée. L'exaltation du champ en bout de sonde métallisée permet de manière semblable d'augmenter le rapport signal sur bruit de la diffusion Raman qui peut renseigner sur la nature ou la structure de l'échantillon. Le chapitre suivant évoque donc l'apport de la microscopie à sonde locale à la spectroscopie Raman. Enfin le dernier chapitre est dédié à un volet très important puisqu'il s'agit des applications de la microscopie champ proche en photonique et nano-optique, domaines où de tels microscopes trouvent naturellement leur intérêt. Ils donnent en effet accès à la caractérisation du champ électromagnétique piégé à l'intérieur des composants photoniques et permet d'en améliorer la compréhension. De même, la plasmonique est aujourd'hui un thème de recherche en pleine expansion et il est étroitement lié à la microscopie champ proche optique : cette relation est abordée en toute fin d'article avant de conclure avec les métamatériaux. Un exposé beaucoup plus exhaustif des applications de la microscopie champ proche en nano-optique peut être trouvé dans [2] ; la référence [3] présente un état de l'art détaillé de la plasmonique et le livre [4], bien que plus ancien, développe clairement la théorie et les applications de la microscopie champ proche.

1 Nanolithographie

La photolithographie des résines photosensibles est une méthode utilisée pour graver des masques dans les laboratoires de microélectronique. D'autres méthodes existent également comme la lithographie par nano-impression qui permet de structurer la résine par déformation mécanique. Pour ce qui concerne la photolithographie, la largeur des traits est limitée par le phénomène de diffraction qui empêche de focaliser parfaitement les faisceaux lumineux en dessous de $0,5 \mu\text{m}$. Les besoins de l'intégration des composants nécessitent des traits plus fins. Pour améliorer la résolution, les faisceaux lumineux peuvent être remplacés par des faisceaux UV lointains, des rayons X ou des faisceaux d'électrons ou d'ions. La nanophotolithographie champ proche permet également d'obtenir des structures à l'échelle du nanomètre en utilisant la sonde comme un stylo. Plus de détails sur cette technique peuvent être trouvés dans la référence [5]. Le SNOM est une alternative lente pour la fabrication d'objet unique ou en petite série.

Les méthodes de la microscopie optique en champ proche permettent de revenir, dans certains cas, à l'utilisation de la lumière visible. La sonde est utilisée comme une nanosource et le temps d'exposition est contrôlé avec des modulateurs acousto-optiques. Les premières expériences [6, 7] ont employé des résines photosensibles qui nécessitent un traitement chimique de révélation après l'exposition. La structure obtenue constitue une réplique de l'intensité lumineuse. Les motifs ainsi inscrits sont mesurés par la suite à l'aide d'un microscope à force atomique. Les auteurs ont tracé des traits de 80 à 100 nm de large. L'utilisation d'un photopolymère comme le PMMA-DR1 permet d'éliminer l'étape de révélation [8]. Le spot lumineux émis par la pointe crée en effet une déformation mécanique du film de polymère. La forme de l'indentation dépend de la nature de la pointe (pointe métallisée ou pointe diélectrique) et de la dose d'irradiation (intensité lumineuse et durée). Les motifs ainsi photogravés sont relus immédiatement par le même microscope fonctionnant en mesure de force de cisaillement (*shear-force*). La figure 1 présente un exemple de photolithographie [8]. Beaucoup d'études s'intéressent aux polymères : il est par exemple possible de modifier localement l'indice d'un polymère sans en changer sa morphologie et sa transparence dans le visible [9] ou encore d'écrire et de relire une information (stockage de données) sur 100 nm en contrôlant la polarisation de la lumière en sortie de sonde pour activer des cycles d'isomérisation *trans-cis-trans*

des chaînes latérales [10].

Les facteurs limitants en nanolithographie sont, outre la lenteur, la longueur d'onde utilisée et l'ouverture de la sonde. La nanophotolithographie à balayage peut donc voir ses performances améliorées en utilisant de la lumière UV [11]. Elle devient alors capable de rivaliser à coûts moindres avec la lithographie électronique : à titre d'exemple des lignes de 20 nm de large séparées également de 20 nm ont pu être réalisées [12]. L'utilisation d'un laser femto-seconde avec des impulsions très courtes permet également d'obtenir des structures nanométriques très inférieures à la longueur d'onde ($\lambda/20$) et moitié moindre que l'ouverture de la sonde [13].

Les pointes à ouverture circulaire souffrent d'une faible transmission ce qui implique un temps d'exposition long pour induire la photolyse. Il est donc envisageable de la remplacer par une ouverture papillon qui, en plus, offre l'avantage d'un plus grand confinement du champ. Wang *et al.* [14] ont ainsi obtenu des trous inférieurs à 50 nm ($\lambda/8$) dans une résine positive et la concentration du champ dans l'entrefer (*feedgap*) peut induire des phénomènes non linéaires [15]. Cependant, dans ces expériences, les ouvertures papillon sont gravées sur un substrat plan et non pas à l'extrémité d'une fibre métallisée.

Une pointe métallique ou métallisée et sans ouverture peut également être utilisée pour réaliser de la photolithographie à l'échelle nanométrique grâce à l'exaltation du champ à son extrémité qui permet de structurer des résines photosensibles [16, 17]. Cette exaltation de champ peut également induire des processus non linéaires dans la résine [18, 19].

La lithographie champ proche peut être appliquée sur toutes sortes de matériaux et de substrats. Malgré la faible puissance en sortie d'une pointe métallisée à ouverture, celle-ci est suffisante pour graver des lignes de 60 nm sur une surface ferroélectrique [20]. De même, il est possible de réaliser l'ablation d'un film d'aluminium par chauffage local (et oxydation thermique) [21, 22] et de nanostructurer des monocouches auto-assemblées qui sont d'une grande utilité pour l'étude de phénomènes aux interfaces comme l'adsorption des protéines et pour l'analyse biologique [23].

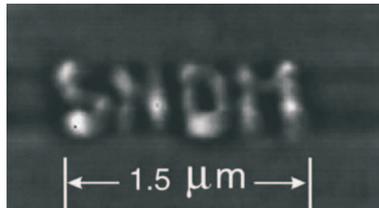


Figure 1 – À gauche : image *shear-force* d'une nanophotolithographie sur du PMMA-DR1 illuminé par la pointe d'un microscope optique en champ proche par réflexion. La finesse des lignes est d'environ 100 nm. Reproduit avec la permission de [8], copyright 1996, AIP Publishing LLC.

2 Biologie

La microscopie électronique par transmission ou à balayage est une technique très employée pour obtenir des images d'objets biologiques avec une résolution submicronique. Mais elle impose de fortes contraintes sur la préparation de l'échantillon (déshydratation, métallisation, observation sous vide) peu compatible avec l'observation d'échantillons « vivants ». Les microscopies à sondes locales apportent de nouveaux moyens d'investigation et l'AFM est un outil

de choix très largement utilisé. Le microscope champ proche optique permet, comme l'AFM, d'enregistrer par exemple la topographie de la surface des cellules mais il donne également accès aux propriétés optiques de leur structure interne avec une résolution nanométrique. Son utilisation étant très peu invasive, il est donc un outil de choix, souple et performant pour la caractérisation d'échantillons biologiques.

L'application du SNOM à la biologie a été envisagée dès ses débuts [24] et les premières images d'objets biologiques sont apparues au début des années 90 (images de cellules de tissu cérébral et de cytosquelette de cellule de fibroplaste [25]). Depuis, des images de bactériophages [26], de flagelles de salmonelles de diamètre 25 nm [27], de cellules cancéreuses HeLa [28], de chromosomes (avec des succès variables du fait des techniques de marquage fluorescent) [29–32], de cellules contractiles du cœur (cardiomyocytes) [33] de virus de la mosaïque du tabac [34] (voir figure 2), de membranes cellulaires et de cytoplasme [35]... ont été publiées. Ces images ont été obtenues tantôt avec un SNOM, tantôt avec un STOM, les résolutions ultimes étant voisines de 20 nm. Dans le domaine des objets biologiques, l'AFM et la microscopie optique en champ proche sont des instruments complémentaires. Un microscope mixte AFM-SNOM (ou STOM) semble même être la combinaison idéale pour ce type d'applications [36] : l'AFM apporte les renseignements topographiques et la microscopie optique permet de conserver en champ proche et en haute résolution toutes les méthodes de marquage par traceur fluorescent largement employées en microscopie traditionnelle. Dans les dix dernières années, plusieurs études de la surface de cellules ont été menées grâce à un SNOM avec des échantillons fluorescents ou non [37–39] et de fines sections de tissus [40]. Dans ce dernier cas, la microscopie électronique en transmission permet d'obtenir une information différente, mais comparable et complémentaire. Trevisan *et al.* ont montré des images tri-dimensionnelles de membranes cellulaires. Un résumé des applications du SNOM à la biologie cellulaire peut-être trouvé dans la référence [41].

La biologie moléculaire s'attache à la compréhension du fonctionnement des cellules à l'échelle des molécules et réclame indubitablement un outil de caractérisation et d'observation présentant une résolution sub-longueur d'onde tel que le SNOM. Xie et Dunn ont ainsi réalisé très tôt des images en fluorescence de protéines, de membranes cellulaires intervenant dans la photosynthèse [42]. Ils ont obtenu des images et des spectres de protéines uniques et étudié en champ proche leur durée de vie de fluorescence. Il est également possible de visualiser au SNOM la localisation de protéines sur une échelle inférieure à celle de la microscopie optique classique [43] ou des pores nucléaires [44], ouvrant la voie vers une observation directe et en temps réel du transport de grands complexes protéiques à travers l'enveloppe nucléaire.

Les nano-antennes que nous avons présentées précédemment [1] peuvent apporter des informations complémentaires en biologie moléculaire et élargir le champ d'application de la microscopie champ proche en amenant la résolution en-dessous de la barre des 10 nm, ce qui correspond à la taille des protéines. Höppener *et al.* ont ainsi proposé comme antenne une sphère d'or greffée sur une pointe diélectrique [45, 46]. De plus les nano-antennes peuvent être fonctionnalisées avec des ligands spécifiques, offrant ainsi la possibilité de reconnaître différentes identités biochimiques. Un commentaire récent sur les applications et l'apport des nano-antennes à l'imagerie biologique à l'échelle nanométrique peut être trouvé dans la référence [47].

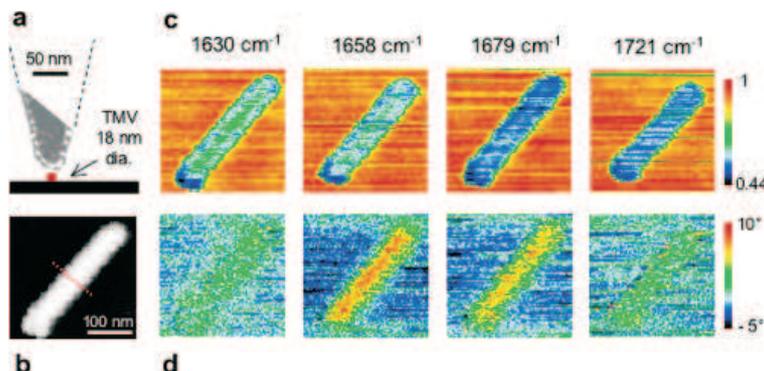


Figure 2 – Images champ proche infra-rouge d’un virus de la mosaïque du tabac (TMV) : (a) topographie ; (b) schéma à l’échelle ; (c, d) amplitude et phase champ proche à différentes fréquences infra-rouge. Reproduit avec la permission de [34], copyright 2006, American Chemical Society.

3 Microscopie de fluorescence et détection de molécule unique

La fluorescence spécifique de certains objets peut être aussi utilisée pour augmenter le contraste des images. Les marqueurs fluorescents de biologie peuvent être employés en champ proche, un simple filtre permettant de séparer les parties marquées du reste de l’objet. En adjoignant un spectroscope à un microscope optique en champ proche, on peut aller bien au-delà de la simple imagerie : augmenter la résolution de toutes les méthodes de spectroscopie optique et étendre ainsi, dans le domaine nanométrique, les possibilités d’analyse chimique. L’obtention d’un spectre à partir d’un microscope optique en champ proche suppose que tout le dispositif fournisse un signal assez important pour être analysé, ce qui implique une optimisation de nombreux paramètres : une grande efficacité de la pointe, un bon couplage de la lumière captée vers le spectroscope et un détecteur très sensible. Un microscope de fluorescence en champ proche [48], pouvant fonctionner sous vide et monté dans un cryostat fonctionnant de la température ambiante à celle de l’hélium liquide, a permis l’étude par spectroscopie de structure à puits quantiques en physique du solide [49]. L’observation de molécules uniques à l’aide d’un SNOM fonctionnant à température ambiante a été publiée la première fois en 1993 [50] ; suivent la spectroscopie de molécule unique (SMS pour *Single Molecule Spectroscopy*) et la mise en évidence d’effet de site par comparaison des spectres de molécules identiques mais situées à des endroits différents [51, 52]. Des expériences de spectroscopie résolue dans le temps par mesure du temps de déclin de fluorescence ont également été effectuées en champ proche sur des molécules uniques [53, 54]. La SMS permet d’étudier au niveau nanométrique la dynamique de molécules individuelles insérées dans un environnement plus ou moins complexe. Les nombreuses applications couvrent bien sûr la biologie et la biochimie mais également la chimie au sens large, et la physique [55]. La microscopie champ proche permet, pour les expériences de SMS, de diminuer le bruit de fond du fait du faible volume de l’échantillon interrogé (taille limitée du spot lumineux) et offre la possibilité d’enregistrer la topographie et la fluorescence simultanément ainsi qu’une information immédiate sur l’orientation du moment dipolaire de la molécule [56]. Cependant, le signal champ proche disparaissant rapidement avec la distance à l’échantillon, l’utilisation du SNOM est rédhibitoire pour certains échantillons biologiques épais comme l’intérieur d’une cellule. Par la suite, d’autres expériences semblables

ont été menées [57] et des images de fluorescence avec une pointe à ouverture de diamètre 20 nm ont été obtenues avec une résolution estimée à 15 nm [58]. Cette super-résolution (inférieure à l'ouverture de la pointe) est attribuée à un transfert d'énergie non radiatif des molécules vers le métal de la sonde. Du fait de son pouvoir de résolution, la microscopie de fluorescence champ proche est beaucoup utilisée en biologie cellulaire pour comprendre la dynamique moléculaire au sein de la cellule, au niveau des membranes [45, 46] ou du noyau et de ses pores [44] mais elle nécessite des marqueurs.

Cependant, le SNOM présente certains inconvénients pour la microscopie de fluorescence. Tout d'abord, l'asservissement *shear-force* classiquement utilisé (voir [1]) n'est pas efficace en milieu liquide, environnement habituel des cellules par exemple. Cet obstacle peut cependant être contourné en travaillant en mode *tapping* [59] ou en enfermant le diapason sous une cloche de plongée [60] : il vibre ainsi dans l'air pendant que la pointe trempe dans le liquide.

L'intensité lumineuse, peu importante étant donnée la faible efficacité des ouvertures nanométriques des sondes, porte également préjudice. Pour remédier à ce faible rapport signal sur bruit, Burgos *et al.* proposent d'utiliser des fibres dopées GeO₂ courbées ayant subi deux étapes d'attaque chimique (puis l'habituelle usinage par FIB pour créer l'ouverture) [61]. Le rendement de fluorescence d'une molécule peut également être augmenté grâce à une exaltation du champ près de nanostructures métalliques. Malheureusement, ces dernières peuvent également provoquer l'extinction de la fluorescence (*quenching*) ou la perte de fluorescence définitive de la molécule (photoblanchiment) qui représente naturellement une limite à la microscopie de fluorescence. Ces deux effets (exaltation / extinction) sont en compétition et en jouant sur leur distance de séparation il est possible d'observer une augmentation ou une diminution de fluorescence [62]. Les microscopes sans ouverture (*Apertureless* SNOM ou ASNOM) exploitent ainsi l'exaltation du champ présent au bout d'une pointe métallique et l'absorption à un [63–66] ou deux photons [67]. Cette dernière fournit un bon contraste du fait de la dépendance quadratique de l'intensité dans ce processus non linéaire. Le photoblanchiment de molécules uniques en utilisant un SNOM a été observé pour la première fois dans la référence [68]. L'extinction de fluorescence peut permettre de générer du contraste optique dans les images optiques : la fluorescence décroît de manière importante lorsque la pointe s'approche de l'échantillon et le *quenching* se produit autour de 10 nm, c'est à dire dans le voisinage immédiat de la pointe [66]. Avec des contacts intermittents entre la pointe et l'échantillon, il est ainsi possible de moduler le taux d'extinction et d'éliminer par la suite le fond continu avec une démodulation. Le temps de vie des niveaux excités est également modifié en fonction de la position relative de la sonde métallique par rapport à la molécule fluorescente [69–71].

Toujours dans l'idée d'augmenter le rapport signal sur bruit, il est bien évidemment possible d'utiliser des nano-antennes. Une nanoparticule d'or ou d'argent greffée à l'extrémité d'une sonde locale peut être utilisée comme une nano-antenne [72, 73]. L'effet d'antenne est lié à l'excitation de la résonance plasmon de la particule. La référence [74] étudie l'influence du diamètre de la particule métallique sur l'exaltation du champ et l'extinction de fluorescence et donc la résolution. Des nano-antennes plus complexes comme des dimères et des trimères de nano-particules d'or [75] ou des nano-ouvertures papillon qui agissent comme des nano-sources très brillantes [76] permettent d'augmenter de manière conséquente le signal issu d'une molécule unique et d'obtenir une mesure vectorielle du champ électromagnétique (voir figure 4). Les nano-antennes représente des perspectives intéressantes pour l'exaltation et le contrôle de la fluorescence de molécules uniques.

Pour terminer cette partie, évoquons la spectroscopie de corrélation de fluorescence (FCS), une autre technique fréquemment utilisée en biologie cellulaire et qui consiste à mesurer l'in-

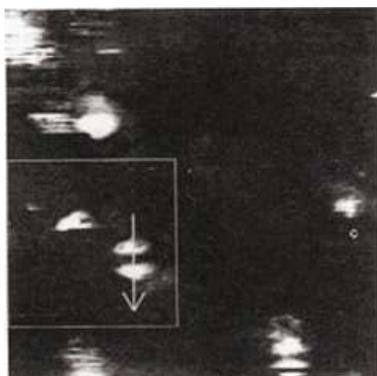


Figure 3 – Image SNOM de molécules uniques de R6G sur une surface de silice à 514 nm ($2.6 \mu\text{m} \times 2.7 \mu\text{m}$)[54]. La taille des spots montre une résolution légèrement sub-longueur d’onde. Les deux lobes sous la flèche correspondent à l’image d’une seule molécule et sont dus à des effets de polarisation [50]. De plus, à cause du photoblanchiment, une molécule (à gauche) s’est éteinte alors que seule la moitié du balayage au-dessus d’elle était réalisé. Reproduit avec la permission de AAAS.

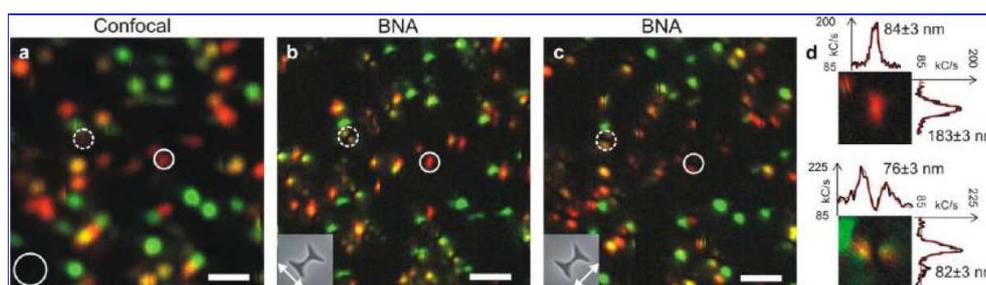


Figure 4 – Cartographie 3D des composantes champ proche optique de molécules individuelles grâce à une nano-antenne papillon. L’échelle (rectangle blanc) mesure $1 \mu\text{m}$. Reproduit avec la permission de [76]. Copyright 2012, American Chemical Society.

tensité de fluorescence et ses fluctuations au cours du temps. Ces fluctuations sont quantifiées par une autocorrélation temporelle du signal d’intensité enregistré : il s’agit d’une procédure mathématique qui évalue la persistance du signal au cours de temps. Cela permet par exemple de remonter aux propriétés des réactions inter ou intra-moléculaire de biomolécules marquées par un marqueur fluorescent. La FCS a été combinée avec un microscope optique champ proche sur des cellules vivantes [77] : l’éclairage issu de la sonde est de taille nanométrique et révèle des détails habituellement masqués par une surface d’éclairage trop grande dans le cas de la microscopie classique.

4 Spectroscopie Raman

La spectroscopie Raman consiste à mesurer le décalage de fréquence de la lumière diffusée de manière inélastique par excitation des états de vibration d’un matériau. Elle permet grâce à la position et à l’intensité des raies visibles dans le spectre enregistrées de remonter par exemple à sa composition chimique, à sa structure cristalline (dans le cas de solides) ou

même aux contraintes mécaniques appliquées à l'échantillon. Les spectres Raman contiennent ainsi une grande richesse d'informations mais les signaux détectés sont beaucoup plus faibles comparés par exemple à la fluorescence, ce qui accroît la difficulté des expériences Raman en champ proche. Les premiers spectres Raman champ proche ont été obtenus en 1994 avec une fibre étirée en pointe de 100 nm [78]. Pour améliorer la résolution et tirer pleinement profit des capacités de résolution de la microscopie champ proche, Jahncke *et al.* ont publié les premières images champ proche Raman avec une pointe métallisée présentant une ouverture de 250 nm [79]. Il leur a fallu un temps d'intégration relativement long (l'image Raman a pris dix heures pour être enregistrée) : ce genre d'expérience exige donc un système très stable. Une résolution spatiale en deçà de 50 nm semble difficilement accessible et les ouvertures des sondes restent toujours de l'ordre de 150 nm pour avoir un signal Raman suffisamment intense [80, 81].

Une solution pour augmenter la quantité de lumière diffusée est d'exalter le champ lumineux grâce à des nanostructures métalliques. Cette technique, connue sous l'acronyme SERS (*Surface Enhanced Raman Scattering* [82, 83]), multiplie le signal Raman par plusieurs ordres de grandeur par rapport à la diffusion Raman conventionnelle et cela rend la spectroscopie Raman suffisamment sensible pour mesurer une molécule unique [84]. Cependant, la plupart du temps, les substrats métalliques sont hétérogènes et donc l'exaltation du champ varie avec la position sur la surface. Le microscope champ proche sans ouverture représente alors une alternative puisque la pointe métallisée offre une exaltation uniforme sur toute la zone de balayage. On parle alors de TERS pour *Tip-enhanced Raman Spectroscopy* (voir le schéma de principe figure 5). L'idée a été proposée en 1985 par J. Wessel [85] mais les premières expériences datent de 2000 [86–88]. Le plus souvent on utilise une pointe AFM métallisée avec de l'or ou de l'argent [89] mais une pointe STM (tungstène) peut également être employée [90]. Notons tout de même que, cette fois, l'exaltation de champ varie d'une pointe à l'autre et qu'avec l'or ou l'argent on peut exciter des résonances plasmons [91–93]. Une solution pourrait être la fabrication de pointe hautement reproductible par la technique dite de *template-stripping* qui utilise un gabarit [94]. Récemment, une résolution de 15 nm est annoncée dans la référence [95] (ces résultats ont été obtenus dans un vide poussé pour diminuer le photoblanchiment) et la spectroscopie de molécule unique par effet de pointe a également été démontrée [96].

En général, l'illumination de la pointe se fait de biais ou par dessous l'échantillon (qui doit alors être transparent), mais il est également possible d'éclairer la pointe par le dessus [97–99] : cet éclairage permet de travailler en réflexion et donc de sonder des échantillons non transparents et il a aussi l'avantage de conserver une certaine symétrie de révolution. La littérature concernant la spectroscopie Raman exaltée par effet de pointe est pléthorique ; un récapitulatif des derniers développements et des applications de la TERS peut être trouvé dans la référence [100].

5 Photonique et nano-optique

La miniaturisation des composants photoniques n'a de sens que si elle permet d'augmenter leur fréquence de travail, de réduire leur coût et leur consommation d'énergie ou de développer des fonctions optiques innovantes. La nanophotonique cherche donc à confiner et manipuler la lumière sur des échelles nanométriques (c'est à dire à contourner les limites imposées par la diffraction) et à développer des matériaux composites artificiels (cristaux photoniques, métamatériaux) ayant des propriétés innovantes. La visualisation en champ lointain (par exemple avec une caméra) de la propagation de la lumière dans les composants photoniques n'est pos-

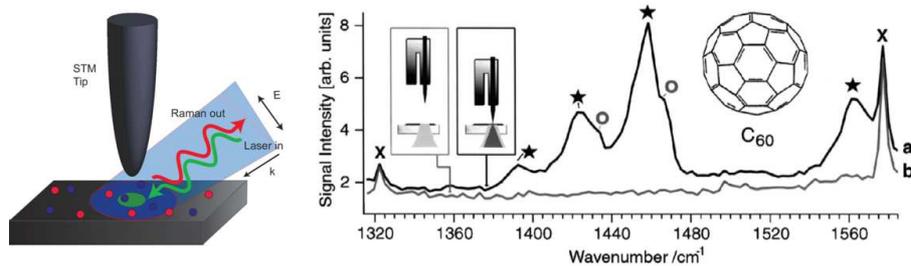


Figure 5 – À gauche : principe de la spectroscopie Raman par effet de pointe (TERS) : le champ lumineux généré par une illumination externe est exalté à l’extrémité d’une pointe métallique (STM ou AFM). Reproduit avec la permission de [96], copyright 2012, American Chemical Society. À droite : exemples de spectres Raman de molécules de fullerène (C₆₀) sur du verre mesurés avec ou sans la pointe (TERS et spectre Raman normal). L’amélioration du rapport signal sur bruit grâce à l’effet de pointe est très nette (200 secondes par spectre). Reproduit de [86], copyright 2000, avec la permission de Elsevier.

sible que si le mode présente des fuites ou si des défauts (intentionnels ou non) diffractent la lumière. Les microscopes optiques champ proche apparaissent alors comme un outil de caractérisation (et éventuellement de manipulation) irremplaçable car ils donnent accès au champ électromagnétique piégé à l’intérieur des composants photoniques sur une échelle sub-longueur d’onde. La configuration SNOM la plus utilisée est le mode collection mais le mode perturbatif avec une sonde sans ouverture peut également fournir de bons résultats [101]. Nous proposons dans les paragraphes suivants de balayer les applications du SNOM à travers quatre grandes thématiques de la micro et nano-photonique, à savoir les guides et cristaux photoniques (CP), la plasmonique et les métamatériaux.

5.1 Guides d’onde et SNOM interférométrique

Les techniques d’imagerie champ proche ont d’abord été utilisées en photonique pour remonter aux champs évanescents des modes existant dans des guides d’onde [102–105] ou dans des composants en optique intégrée : coupleurs directionnels, jonctions Y, amplificateur optique à base de semi-conducteur, sortie de fibre monomode clivée [106–108]. . . Ces résultats ont été obtenus sur des guides d’onde diélectriques mais d’autres types ont également été caractérisés aux longueurs d’onde télécom (InP/InGaAsP [109], AlGaAs [110], TiO₂, guide à fente multimode en silicium [111]. . .). Ces premières études SNOM ont permis de démontrer la décroissance du champ évanescents, de remonter à l’indice effectif des modes et aussi de mettre en évidence une modulation d’intensité dans la direction de propagation [104, 109, 112]. Certains [109] attribuent ces franges d’interférences perpendiculaires à la direction de propagation de l’onde à l’effet Tien prédit dès 1965 [113]. Cet effet est relié à la compétition entre la convergence induite par le gradient d’indice dans le guide d’onde et la divergence due à la diffraction. Pour d’autres, ces ondes stationnaires sont liées à la détection par la pointe d’un champ formant un fond quasi-homogène [114].

Habituellement le SNOM ne détecte que l’intensité du champ évanescents, ce qui permet par exemple d’accéder au profil des modes ou de mesurer les pertes. Cependant, il est nécessaire d’obtenir une information plus riche pour caractériser complètement les composants photoniques. En insérant le SNOM dans un interféromètre type Mach-Zender, il devient possible de

mesurer l'amplitude, la phase, les modes de Bloch et par exemple de suivre dans le temps la propagation d'impulsions dans des microstructures photoniques et de mesurer les vitesses de groupe et de phase. Il a été proposé il y a déjà une dizaine d'années de recombinaison par le biais d'un coupleur la lumière détectée par la pointe avec un signal de référence issu du même laser et donc de même fréquence (détection homodyne). On peut ainsi déterminer l'amplitude et la phase du champ capté par la pointe. Campillo *et al.* ont pu ainsi mesurer l'indice effectif de modes dans un guide obtenu par diffusion de titane sur niobate de lithium [112].

Cependant, l'interférométrie homodyne manque parfois de stabilité et de robustesse, mais surtout, elle est sensible aux variations de la lumière ambiante (qui affectent la composante continue du signal). Aussi pour pallier ces limites, une détection champ proche hétérodyne, plus stable mais aussi plus complexe à mettre en oeuvre, a été développée par différents groupes. Le principe du SNOM hétérodyne (H-SNOM) consiste à introduire entre les deux bras de l'interféromètre un léger décalage de fréquence $\Delta f = f_1 - f_2$ grâce à deux modulateurs acousto-optiques. Le signal d'interférence détecté est alors modulé en intensité avec une fréquence de battement Δf [115–117] qui est basse fréquence et peut donc facilement être détecté. Ainsi, l'évolution de la phase dans un guide d'onde optique a été visualisée à l'échelle sub-longueur d'onde pour la première fois grâce à un SNOM utilisant une détection hétérodyne [118]. La même équipe a également mis en évidence la transformation graduelle en un mode double intermédiaire du mode guidé TM_{00} arrivant sur une jonction Y [119]. À noter que le SNOM hétérodyne à perturbation a également fait ses preuves pour caractériser des guides d'onde en optique intégrée [120].

Le SNOM hétérodyne devient un outil très puissant lorsqu'il permet en plus des mesures résolues en temps. En effet, la longueur du bras de référence (et donc le temps mis par une impulsion pour parcourir cette branche de l'interféromètre Mach-Zender) peut être contrôlée par une ligne à retard. Les interférences n'auront lieu que s'il y a un recouvrement temporel au niveau du détecteur entre les impulsions qui parcourent chacun des deux bras. Grâce à cette ligne à retard, la propagation d'une impulsion ultra-courte à travers une structure photonique peut être visualisée (*pulse tracking*), donnant une idée du comportement dynamique des composants intégrés optiques et un accès direct aux vitesses de phase et de groupe. Ce type de mesures a été réalisé d'abord sur un guide d'onde dispersif [121, 122] (voir figure 6) ou bimodal [123], sur un guide d'onde ruban présentant un réseau de Bragg nanométrique [124] puis sur un micro-résonateur en anneau [125]. Les auteurs ont cartographié les modes de ce résonateur dans l'espace et le temps, suivant l'impulsion pendant plusieurs tours. Enfin, le principe du H-SNOM peut être généralisé de sorte à obtenir durant le balayage l'amplitude et la phase pour les deux polarisations TE et TM (SNOM multihétérodyne ou MH-SNOM [126, 127]). Il suffit pour cela de décaler en fréquence le signal issu de la pointe et la référence avec un retard qui diffère selon la polarisation (le MH-SNOM nécessite donc quatre modulateurs acousto-optiques). Grâce au MH-SNOM, Sfez *et al.* ont pu vérifier que les modes de Bloch de surface d'une structure diélectrique multi-couches obéissent aux lois de Snell-Descartes [128].

En résumé, les techniques d'interférométrie champ proche sont très fructueuses, cependant leur mise en oeuvre est très délicate car elles sont très sensibles aux conditions ambiantes (vibrations, température, courant d'air...). Le SNOM hétérodyne résolu en temps a bien sûr été utilisé pour caractériser d'autres structures photoniques, et plus particulièrement les plus nouvelles d'entre elles, à savoir les cristaux photoniques (CP) : c'est l'objet de la section suivante.

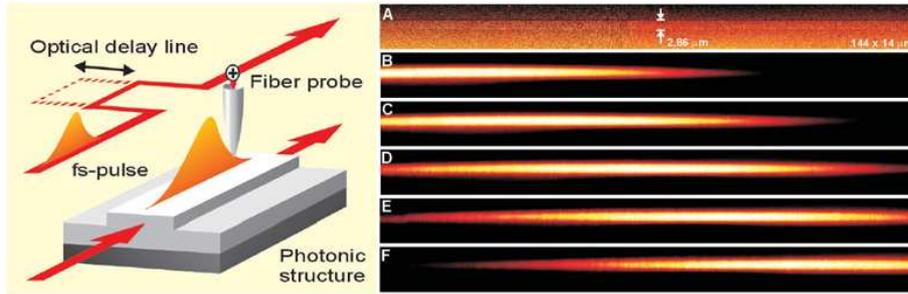


Figure 6 – Mesure de la progression d’une impulsion dans un guide d’onde. À gauche : schéma de principe. Le signal détecté par la pointe est recombinaé avec une impulsion référence avec laquelle il interfère. À droite : (A) image topographique ($144 \times 14 \mu\text{m}^2$) et (B à F) images optiques décalées dans le temps de 133 fs : on y voit l’impulsion lumineuse se propager, phénomène inobservable en champ lointain. D’après [121], reproduit avec la permission de AAAS.

5.2 Cavités et cristaux photoniques

Les cristaux photoniques (CP) sont des micro-structures avec une périodicité uni-, bi- ou tridimensionnelle de la permittivité. Cette périodicité permet ou non la propagation de la lumière en fonction de sa fréquence et la recherche sur leurs propriétés et leurs nombreuses applications est extrêmement active depuis un peu plus de vingt ans. La constante de propagation de la lumière dans les CP est plus grande que celle en propagation libre dans l’air, le champ y est donc évanescent et par conséquent des techniques en champ lointain ne peuvent y accéder. Comme pour les composants photoniques classiques, nous verrons que l’on peut se contenter de détecter l’intensité ou alors, de manière plus complète, l’amplitude et la phase grâce au SNOM interférométrique.

Le lecteur trouvera un exposé plus exhaustif sur la caractérisation champ proche des guides à CP dans la référence [129]. Les premiers résultats champ proche sur les CP ont simplement mesurer l’intensité et la transmission à travers des CP 2D [130–134]. Les images champ proche montrent la distribution d’intensité le long des guides d’onde photoniques. Elle est quasi-périodique et l’on retrouve les interférences perpendiculaires à la direction de propagation évoquées précédemment. Des structures à CP plus compliquées ainsi que différents phénomènes ont également été caractérisés en intensité, permettant de remonter aux pertes et aux profils des modes : guides courbés à $1,5 \mu\text{m}$ formés par l’absence d’une rangée de trous montrant un bon confinement du mode et peu de pertes par propagation [114, 135], guide d’onde photonique sur substrat de niobate de lithium [136], lumière lente [137], couplage entre la pointe SNOM et un cristal 3D [138], faisceaux directionnels émergeant d’un guide à CP avec une faible divergence [139], couplage entre les modes pair et impair d’un guide à CP [140]. . .

Les résultats les plus intéressants ont cependant été obtenus avec un SNOM à détection homodyne ou hétérodyne (voir la partie précédente 5.1) qui permet d’aborder le comportement dynamique des structures à CP. Grâce au H-SNOM, Gersen *et al.* ont pu observer directement les modes de Bloch d’un guide d’onde à CP, mesurer une vitesse de phase négative et obtenir expérimentalement son diagramme de dispersion en répétant les mesures pour toute une gamme de longueurs d’onde [141]. Le MH-SNOM (voir section 5.1) permet quant à lui des études en fonction de la polarisation et Sfez *et al.* ont pu analyser en champ proche le couplage d’une onde de surface TE avec un CP 1D périodiquement structuré au niveau de sa

face supérieure pour des applications biocapteurs [142].

Les propriétés des CP ne sont pas seulement intéressantes pour la fabrication de guides d'onde ou de capteurs : elles permettent également de réaliser des cavités optiques à fort potentiel. Les micro-cavités à CP sont constituées de réseaux périodiques de trous comportant un défaut (zone où les trous sont de tailles différentes, absence de trou...). Le temps de vie des photons piégés à l'intérieur de ce très faible volume (environ la longueur d'onde au cube) est supérieur à la nanoseconde et les microcavités présentent donc de hauts facteurs de qualité (supérieurs à 10^6). Les applications potentielles concernent par exemple les filtres en longueur d'onde, les sources de photons uniques et les nano-lasers sans seuil ou reposant sur des processus présentant un très faible gain comme la diffusion Raman. La microscopie optique champ proche est un outil puissant pour analyser le profil des modes confinés dans ces nanocavités. La première cavité étudiée a été une cavité hexagonale basée sur un CP 2D gravé dans une membrane InP suspendue [143]. De nombreuses autres études ont suivi (voir par exemple [144–147]), démontrant clairement l'aptitude de la microscopie champ proche optique à nous renseigner sur les propriétés spectrales mais aussi sur les distributions de champ des modes des micro-cavités à CP.

La plupart de ces études utilisent une pointe diélectrique nue. Une pointe métallisée à ouverture permet de ne détecter que les modes localisés de la cavité au détriment des modes propagatifs et donc d'améliorer la résolution de la cartographie des profils des modes [148]. Cependant, une telle sonde peut modifier les caractéristiques spectrales de la cavité de façon plus importante que la pointe diélectrique nue pour laquelle la perturbation induite sur un cristal actif 2D existe mais reste faible [149–152]. À l'inverse, il peut être intéressant de vouloir contrôler les résonances des cavités avec une grande finesse pour, par exemple, développer des commutateurs en optique intégrée. La perturbation qu'introduit la sonde d'un SNOM peut permettre d'y parvenir [153]. Comparée aux autres méthodes, cette technique apporte un décalage de fréquence rapide, stable dans le temps et uniquement limitée par les résonances mécaniques. La plupart de ces techniques introduisent un décalage des résonances vers le rouge mais des ouvertures circulaires dans des pointes métallisées peuvent décaler cette résonance vers le bleu grâce à l'interaction avec le champ magnétique (loi de Lenz) [154, 155]. Une pointe AFM silicium placée de manière opportune dans le champ très localisé d'une cavité à CP entraîne également des modifications de la cavité et peut permettre d'accorder sa résonance sur quelques nanomètres et de faire varier son facteur de qualité de 0 à 615 [156, 157].

5.3 Plasmonique

Le plasmon est le quantum d'énergie des oscillations collectives d'un gaz d'électrons (plasma) à des fréquences optiques (pour le cas qui nous intéresse ici). Le couplage d'un plasmon et d'un photon crée une autre quasi-particule appelée polariton (couplage entre une onde lumineuse et une onde de polarisation électrique) mais très souvent on fait la confusion entre les vocables plasmon et polariton. La plupart de leurs propriétés peut être calculée directement à partir des équations de Maxwell et le plasmon est vu comme une résonance électromagnétique qui a lieu à l'interface entre un métal noble (or, argent...) et un diélectrique (le plus souvent l'air). Cette onde qui peut être localisée ou de surface est à la base de la plasmonique [3], discipline très fertile de la photonique moderne qui cherche à tirer profit des propriétés uniques des plasmons (confinement de la lumière dans de très petites dimensions, exaltation du champ, sensibilité aux conditions environnantes...) et à concrétiser ses nombreuses applications potentielles (voir par exemple les chapitres 3 et 4). Grâce au développement des

nano-technologies et des techniques d'usinage, la plasmonique a connu un développement sans précédent depuis les années 2000. Aussi serait-il illusoire de vouloir recenser dans ce court paragraphe toute la bibliographie ayant trait à la microscopie champ proche et à la plasmonique. Nous nous contenterons dans la suite d'un tour d'horizon des applications de la microscopie champ proche en plasmonique. Le lecteur intéressé pourra trouver de plus amples informations dans la référence [158].

La plasmonique et la microscopie champ proche sont intimement liées et ont tiré avantage l'une de l'autre dès la mise en place des premiers SNOM. Sans même parler de la haute résolution qu'offre le SNOM pour la caractérisation des plasmons de surface (PS), l'éclairage par la pointe est une nouvelle possibilité pour exciter de manière très locale (là où se trouve la pointe) un PS à la manière de la configuration de Otto [159, 160] (excitation grâce au champ diffracté par la nano-ouverture [161]). Il est possible aussi d'exploiter en microscopie champ proche le confinement de la lumière dû au plasmon au bout d'une pointe métallisée (voir [1]) ou la lumière diffractée en champ lointain par l'interaction entre un PS et une pointe STM afin d'améliorer la résolution latérale. Specht *et al.* ont ainsi obtenu une résolution de 3 nm soit $\lambda/200$ avec une pointe STM [162], mais une pointe AFM peut aussi être utilisée de la même manière [163]. Cependant, une pointe métallique ou métallisée est susceptible d'introduire de forte interaction avec le PS et peut donc modifier localement le champ électromagnétique par couplage. Une pointe diélectrique nue introduit une perturbation moins importante du fait de son faible indice (comparé au métal ou même au silicium dans le cas de pointes AFM). Une telle pointe peut alors être considérée comme passive et elle permet tout de même d'atteindre des résolutions importantes (100 nm à 633 nm pour la référence [164]).

Jusqu'au développement des techniques champ proche et du fait de la nature non radiative des PS, leur observation se faisait de manière indirecte, par exemple en mesurant la réflectivité d'un film métallique dans la configuration de Kretschmann [160, 165]. Par contre, Une pointe SNOM peut sonder le voisinage immédiat de la surface et collecter l'intensité lumineuse associée au PS, ce qui en fait un outil de caractérisation incontournable. Historiquement, les premières mises en évidence de PS en microscopie champ proche ont été réalisées sur des films métalliques plans [166–168], sur une particule unique d'or [169, 170] ou sur des particules d'argent [171, 172]. Ces enregistrements permettent également de remonter de manière indirecte à la longueur de propagation du PS qui est limitée, certes par les pertes intrinsèques dues à l'absorption du métal, mais surtout par les imperfections de la surface métallique (rugosités) [173, 174]. Ces travaux ont ouvert la voie vers le contrôle de la propagation des PS par structuration de l'interface métal/diélectrique. Des mesures résolues en temps sont également réalisables grâce à une détection hétérodyne (H-SNOM). L'information sur l'amplitude et la phase du champ électromagnétique associé au PS permet, en plus de la cartographie spatiale, de cerner le comportement dynamique de nano-structures plasmoniques [175, 176].

Les PS n'existent pas seulement pour des surfaces planes, mais aussi pour des surfaces nanostructurées ou pour des nano-particules métalliques : on parle alors de plasmons localisés. Ces dernières permettent alors de contrôler le plasmon, de créer des guides plasmoniques et d'obtenir des réponses optiques particulières en vue d'applications en nano-photonique. Des études expérimentales en champ proche ont ainsi été menées sur des rubans métalliques [177, 178] ou sur des nano-fils [179], sur des composants de l'optique intégrée comme des séparateurs de faisceaux, des interféromètres, des miroirs de Bragg, des guides plasmoniques, des résonateurs [180–184] ou des composants plus complexes comme des lanceurs [185] et des répartiteurs plasmoniques [186]. Il est également possible de fabriquer des lentilles plasmoniques qui permettent de focaliser sur une zone sub-longueur d'onde les composantes évanescentes

d'un objet illuminé : leur caractérisation se fait naturellement par imagerie champ proche [187–190].

Beaucoup d'autres structures plasmoniques suscitent l'intérêt de la communauté scientifique et ont donc été caractérisées en champ proche. C'est le cas par exemple de nano-trous uniques dans des films métalliques opaques [191, 192] qui peuvent être assimilés à des sources ponctuelles de PS, ou alors de matrices périodiques de nano-ouvertures. Ces matrices présentent de nombreuses propriétés et entre autre une transmission importante qualifiée d'extraordinaire. Les PS générés, s'ils ne sont pas toujours à l'origine de cette transmission extraordinaire, y jouent un rôle clef que les études champ proche permettent d'appréhender [193–196]. Une autre thématique très porteuse est celle des nano-antennes dont la microscopie optique champ proche s'enrichit (voir [1]) mais qu'elle permet également de faire progresser, les applications des nano-antennes dépassant largement le cadre des sondes champ proches (contrôle cohérent, métamatériau...). Les paramètres géométriques et les modes champ proche des nano-antennes sont intimement reliés et leurs fonctionnalités qui sont paramétrables pour des applications variés reposent sur la compréhension fine de cette relation. Encore une fois, la microscopie champ proche permet d'en avoir un aperçu [197–200].

La dernière illustration des applications de la microscopie champ proche en plasmonique concerne un nouveau matériau pour lequel la communauté scientifique montre aujourd'hui un enthousiasme aussi soudain que débordant. Le graphène présente en effet des propriétés étonnantes et il ne se contente pas de bouleverser uniquement la mécanique ou la micro-électronique. Du point de vue optique, il présente en effet une absorption constante (2,3% par couche) sur une large gamme spectrale, la mobilité des électrons y est importante (très bon conducteur), il affiche une forte non linéarité du troisième ordre ($|\chi^3| \sim 10^7$ esu), une absorption saturable, il est accordable par dopage ou avec une tension (électro-optique) et susceptible d'être le siège d'une résonance plasmon avec un très haut facteur de qualité dans le téra-hertz ou l'infra-rouge (IR). Toutes ses propriétés en font un matériau à fort potentiel en photonique et plasmonique [201–203]. Comparée à celle de l'or, la fréquence plasmonique sur graphène présente évidemment l'énorme avantage d'être accordable (de 1 THz à $2 \cdot 10^{14}$ Hz) mais la longueur d'onde λ_p du PS y est également beaucoup plus courte (de l'ordre de 200 nm à 30 THz soit une longueur d'onde dans le vide de $10 \mu\text{m}$ correspondant à l'infra-rouge moyen) conduisant à un confinement beaucoup plus important. Cependant, les rapports longueur de propagation sur longueur d'onde sont du même ordre de grandeur ce qui relativise l'alternative que représente le graphène face à l'or pour les applications plasmoniques [204]. Les premiers travaux sur ce thème ont été théoriques du fait de l'écart important entre les vecteurs d'onde des PS associés au graphène et des photons dans le vide, écart qui rend l'excitation de la résonance plasmonique difficile. La démonstration expérimentale du couplage lumière-plasmon est venue en 2011 dans le régime térahertz et en utilisant un réseau périodique de micro-rubans de graphène de 1 à $4 \mu\text{m}$ de large [205]. L'autre solution est bien sûr un couplage direct en champ proche : Fai *et al.* [206] ont ainsi mis en évidence une résonance plasmonique en focalisant un laser IR sur l'extrémité d'une pointe AFM métallisée et positionnée au voisinage immédiat d'une interface graphène/SiO₂ (voir figure 7). Leur SNOM perturbatif leur a permis d'accéder à la phase et à l'amplitude du signal diffracté en champ lointain par la pointe grâce à une détection interférométrique pseudo-hétérodyne [207]. Le S-SNOM permet ainsi la spectroscopie et la cartographie à l'échelle nanométrique des PS sur du graphène sans avoir recours à la fabrication d'une nano-structure périodique. Les références [208] et [209] utilisent cette même technique pour démontrer le contrôle efficace des PS sur graphène en appliquant un champ électrique perpendiculaire au feuillet de graphène qui a pour conséquence de modifier

la densité de porteurs de charges. Sans vouloir le surprendre, le graphène semble tout de même être un matériau très prometteur et une alternative crédible aux nano-structures métalliques classiques. Il est idéal pour la réalisation de composants plasmoniques IR actifs.

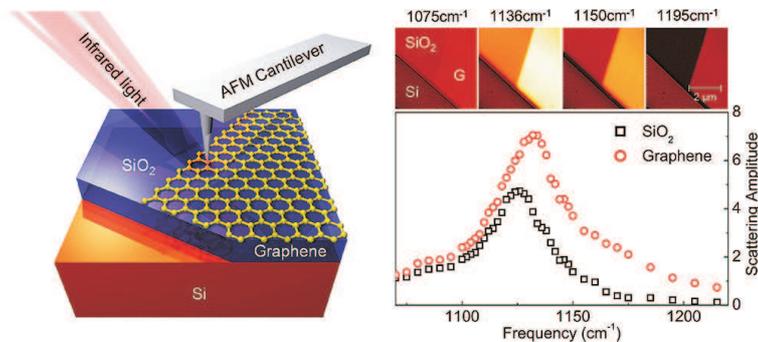


Figure 7 – À gauche : schéma de l'expérience d'analyse champ proche utilisé pour l'excitation et l'observation de PS sur un feuillet de graphène sur un substrat SiO₂/Si. En haut à droite : images champ proche IR de l'échantillon pour 4 fréquences IR différentes et montrant un contraste variable entre les surfaces de Si, SiO₂ et de graphène. En bas : spectre du champ proche diffracté. Reproduit avec la permission de [206], copyright 2011, American Chemical Society.

5.4 Métamatériaux et nanostructures métallo-diélectriques

Les métamatériaux ont déjà été évoqués dans la référence [1] où la nano-structuration de la sonde permet d'obtenir une réponse originale. Les métamatériaux constituent par eux-mêmes un thème de recherche très actif [210, 211]. Puisque, pour obtenir un indice négatif ou une réponse magnétique aux fréquences optiques, il est nécessaire de réaliser une structuration périodique sub-longueur d'onde, l'apport de la microscopie champ proche est primordial. Quelques exemples sont abordés dans la suite de ce paragraphe.

En 2005, Moerland *et al.* démontrent l'utilité du SNOM pour évaluer les performances d'une lentille (quasi-)parfaite à permittivité négative [212] constituée d'une fine strate métallique [213]. La sonde à ouverture (diamètre de 100 nm), placée à quelques nanomètres de la couche métallique, est utilisée comme une source d'ondes évanescentes. Des molécules fluorescentes insérées dans le substrat (matrice de polymère) se comportent alors comme des nano-détecteurs sensibles à la nature vectorielle du champ. C'est une mise en évidence directe qu'un film métallique (permittivité négative) peut se comporter comme une lentille parfaite et qu'il permet d'obtenir une information comprenant de hautes fréquences spatiales.

Les matrices d'ouvertures annulaires sub-longueur d'onde présentent une transmission extraordinaire et des propriétés qui les font entrer dans la classe des métamatériaux. La transmission est due à un mode guidé qui s'établit et résonne dans chacune des cavités : l'existence du mode TE₁₁ a été établie par une cartographie champ proche au dessus de ces matrices. Les mesures obtenues en réflexion [214] ou en transmission [215] avec une pointe diélectrique nue montrent en effet au dessus des nano-ouvertures coaxiales une distribution d'intensité en forme de grain de café typique du mode TE₁₁. D'autres mesures ont été rapportées avec une pointe métallisée à ouverture [216] mais le fort couplage entre ce type de pointe avec le champ lumineux diffracté par l'objet complique l'interprétation des images. La microscopie champ

proche a également donné accès aux différents modes propres de matrices de résonateurs en anneaux fendus (SRR) [217, 218] et ces résultats expérimentaux confirment de manière directe les conclusions théoriques (voir figure 8).

Les métamatériaux permettent également un contrôle et une mise en forme sub-longueur d'onde de la distribution locale d'intensité grâce à la polarisation ou la longueur d'onde du faisceau incident (applications pour le piégeage optique, la spectroscopie, la diffusion Raman...). Cela a été démontré pour une structure bi-périodique constituée d'un motif en écailles de poisson formé par un nano-fil d'aluminium (50 nm de large) sur un substrat de silice où la distribution d'intensité en champ proche dépend de la polarisation et de la longueur d'onde [219]. Le même type d'expérience a été mené dans la référence [220] où cette fois, le contrôle de la polarisation permet d'exciter ou non des modes guidés confinés dans des nano-fentes perpendiculaires. On obtient grâce à ce type de nano-structures des points « chauds » très locaux que l'on peut facilement positionner, éteindre ou allumer et ce, avec une résolution sub-longueur d'onde. Ceci permet de produire des nano-sources de lumière dont la distribution est contrôlée.

Le dernier exemple que nous citons concerne une étude champ proche récente de l'anisotropie d'une matrice de nano-fils plasmoniques [221]. Les propriétés de polarisation en champ proche des échantillons ont été étudiées en combinant un SNOM avec un montage de polarimétrie dynamique. Le dichroïsme intrinsèque de la pointe (dû par exemple à sa forme anisotrope) a dû être compensé et cette technique peut marquer une étape vers la compréhension des problèmes de polarisation en champ proche.

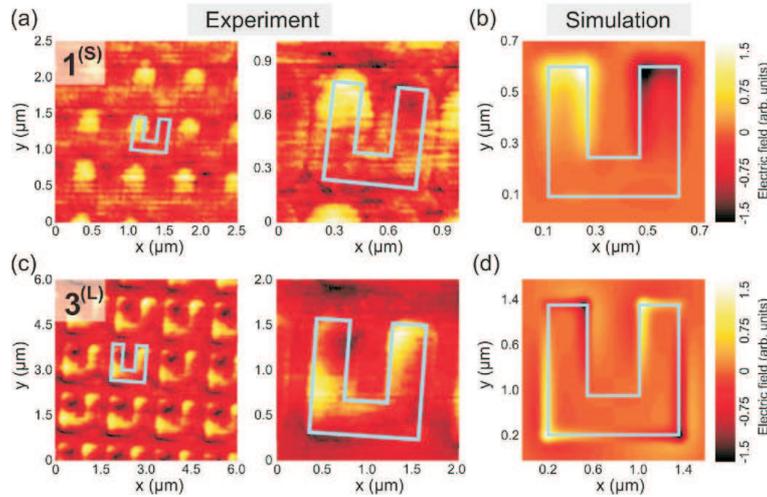


Figure 8 – Images champ proche expérimentales (ASNOM) et théoriques à $\lambda = 2,65 \mu\text{m}$ d'une matrice de SSR pour les modes de premier (a et b) et troisième ordre (c et d). D'après [217], copyright 2010, reproduit avec la permission de Optical Society (OSA).

6 Conclusion

La microscopie champ proche optique a atteint aujourd'hui une certaine maturité et jamais le besoin de mesures optiques à l'échelle nanométrique n'a été aussi essentiel pour répondre aux nouveaux défis de la nanoscience et de la biologie. Les STOM ou SNOM à ouverture appontent

souvent une information complémentaire à d'autres techniques comme l'AFM ou le STM et la cartographie sub-longueur d'onde du champ électromagnétique au-dessus d'échantillons très variés est l'application la plus naturelle de la microscopie champ proche. Si la mesure recherchée requiert un fort pouvoir de résolution, l'expérimentateur se tournera de préférence vers un microscope sans ouverture avec une pointe métallique ou diélectrique, avec une molécule unique greffée en bout de sonde, une nano-particule fluorescente...

La sonde est l'élément central d'un microscope champ proche puisque la résolution et la nature du signal détecté dépendent de sa forme, de sa nature. Elle peut aussi être vue comme un moyen de perturber très localement un objet pour mesurer ou modifier sa réponse optique. Ce point de vue offre de nouvelles perspectives et apporte des applications nouvelles qui s'ajoutent à la simple cartographie optique. Ces dernières années ont vu le développement de sondes actives et le concept de nano-antennes (voir [1]) permet encore d'assouplir le fonctionnement des SNOM/STOM en offrant une détection sélective du champ électromagnétique que les pointes rayonnent ou collectent (polarisation, sensibilité au champ électrique ou magnétique, etc). Les nano-antennes aident également à une meilleure compréhension de l'interaction lumière-matière à l'échelle nanométrique en sélectionnant clairement la nature du signal détecté. Ces sondes sophistiquées sont *in fine* des capteurs très locaux et amène donc un énorme potentiel de caractérisation optique démultiplié par les nombreuses possibilités de configurations et de modes opératoires des microscopes optiques champ proche.

Si les versions STOM et SNOM sont les plus classiques, il n'existe pas réellement de montage type de microscope champ proche. Chaque combinaison repose sur un choix d'éclairage et de détection, sur un type de sonde (diélectrique, métallique, avec ou sans ouverture...), sur le balayage (à hauteur ou distance constante), sur la nature du signal détecté... et ce choix se fait en fonction du résultat expérimental recherché. En résumé, les applications de la microscopie optique en champ proches sont aussi nombreuses qu'il existe de configurations de microscope et cet article ne fait qu'en résumer les plus courantes et les plus avantageuses. Ainsi est-il possible d'apporter la résolution nanométrique inhérente à la microscopie champ proche à la spectroscopie de molécule unique, à la microscopie de fluorescence, ou à la spectroscopie de vibrations moléculaire (spectroscopie Raman). Ces applications fournissent des informations essentielles en biochimie ou biologie. Le potentiel des microscopes champ proche le plus notable réside cependant en photonique et nano-optique où il est un outil incontournable. Il offre un aperçu unique du comportement de la lumière à l'échelle sub-longueur d'onde et cet aperçu peut même avoir une dimension temporelle. Il permet ainsi de comprendre et d'améliorer la conception des cristaux photoniques, des nanostructures plasmoniques, des métamatériaux. Notons que la plasmonique et la microscopie champ proche bénéficient d'une synergie singulière : les plasmons de surface exaltent par exemple le champ électromagnétique au bout d'une sonde métallisée ce qui permet d'augmenter le rapport signal sur bruit des microscopes champ proche et, inversement, seuls ces derniers peuvent donner une caractérisation directe des nanostructures plasmoniques.

L'interprétation des images obtenues en champ proche optique reste délicate car celles-ci peuvent comporter de nombreux artefacts dus au balayage de la sonde, aux interactions (non souhaitées) entre la pointe et l'échantillon... et ces artefacts qui ne sont pas propres à la réponse optique de l'objet brouillent la compréhension des résultats expérimentaux [222]. Il est donc nécessaire d'accompagner les mesures de simulations numériques. Plusieurs méthodes de calcul sont disponibles : méthode de la fonction de Green, méthodes de Fourier (méthodes modales, RCWA pour *Rigorous Coupled-Wave Analysis*) et les méthodes de discrétisation classiques plus gourmandes en mémoire et temps de calcul (éléments finis, FDTD, voir section

outils logiciels). Ces simulations sont a priori très complexes car les problèmes posés offrent souvent peu de symétrie et les applications variées fournissent des informations qui dépassent la simple imagerie optique et qui font appel à des concepts plus généraux en science de la matière, en chimie ou en biologie.

Références

- [1] J. SALVI et D. VAN LABEKE : Microscopie optique en champ proche. Principe. *Techniques de l'Ingénieur*, P862, 2014.
- [2] A. ZAYATS et D. RICHARDS, éditeurs. *Nano-optics and Near-field Optical Microscopy*. Nanoscale Science and Engineering. Artech House, 2008.
- [3] S. MAIER : *Plasmonics : Fundamentals and Applications*. Springer, 2010.
- [4] D. COURJON et C. BAINIER : *Le champ proche optique : théorie et applications*. Collection technique et scientifique des télécommunications. Springer, 2001.
- [5] R. BACHELOT : Nanophotolithographie en champ proche. *Techniques de l'Ingénieur*, NM 556, 2007.
- [6] G. KRAUSCH, S. WEGSCHEIDER, A. KIRSCH, H. BIELEFELDT, J. C. MEINERS et J. MLYNEK : Near field microscopy and lithography with uncoated fiber tips : a comparison. *Opt. Commun.*, 119:283–288, 1995.
- [7] I. I. SMOLYANINOV, D. L. MAZZONI et C. C. DAVIS : Near-field direct-write ultraviolet lithography and shear force microscopic studies of the lithographic process. *Appl. Phys. Lett.*, 67(26):3859–3861, 1995.
- [8] S. DAVY et M. SPAJER : Near field optics : Snapshot of the field emitted by a nanosource using a photosensitive polymer. *Appl. Phys. Lett.*, 69(22):3306–3308, 1996.
- [9] S. TAKAHASHI, K. SAMATA, H. MUTA, S. MACHIDA et K. HORIE : Refractive-index patterning using near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 78(1):13–15, 2001.
- [10] V. LIKODIMOS, M. LABARDI, L. PARDI, M. ALLEGRI, M. GIORDANO, A. ARENA et S. PATANÈ : Optical nanowriting on azobenzene side-chain polymethacrylate thin films by near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 82(19):3313–3315, 2003.
- [11] R. RIEHN, A. CHARAS, J. MORGADO et F. CACIALLI : Near-field optical lithography of a conjugated polymer. *Appl. Phys. Lett.*, 82(4):526–528, 2003.
- [12] S. SUN et G. J. LEGGETT : Matching the resolution of electron beam lithography by scanning near-field photolithography. *Nano Lett.*, 4(8):1381–1384, 2004.
- [13] Y. LIN, M. H. HONG, W. J. WANG, Y. Z. LAW et T. C. CHONG : Sub-30 nm lithography with near-field scanning optical microscope combined with femtosecond laser. *Appl. Phys. A*, 80:461–465, 2005.

- [14] L. WANG, S. M. UPPULURI, E. X. JIN et X. XU : Nanolithography using high transmission nanoscale bowtie apertures. *Nano Lett.*, 6(3):361–364, 2006.
- [15] A. SUNDARAMURTHY, P. J. SCHUCK, N. R. CONLEY, D. P. FROMM, G. S. KINO et W. E. MOERNER : Toward nanometer-scale optical photolithography : Utilizing the near-field of bowtie optical nanoantennas. *Nano Lett.*, 6(3):355–360, 2006.
- [16] F. H'DHILI, R. BACHELOT, G. LERONDEL, D. BARCHIESI et P. ROYER : Near-field optics : Direct observation of the field enhancement below an apertureless probe using a photosensitive polymer. *Appl. Phys. Lett.*, 79(24):4019–4021, 2001.
- [17] A. TARUN, M. R. H. DAZA, N. HAYAZAWA, Y. INOUE et S. KAWATA : Apertureless optical near-field fabrication using an atomic force microscope on photoresists. *Appl. Phys. Lett.*, 80(18):3400–3402, 2002.
- [18] S. KAWATA, H.-B. SUN, T. TANAKA et K. TAKADA : Finer features for functional microdevices. *Nature*, 412:697–698, 2001.
- [19] X. YIN, N. FANG, X. ZHANG, I. B. MARTINI et B. J. SCHWARTZ : Near-field two-photon nanolithography using an apertureless optical probe. *Appl. Phys. Lett.*, 81(19):3663–3665, 2002.
- [20] J. MASSANELL, N. GARCÍA et A. ZLATKIN : Nanowriting on ferroelectric surfaces with a scanning near-field optical microscope. *Opt. Lett.*, 21(1):12–14, 1996.
- [21] S. NOLTE, B. N. CHICHKOV, H. WELLING, Y. SHANI, K. LIEBERMAN et H. TERKEL : Nanostructuring with spatially localized femtosecond laser pulses. *Opt. Lett.*, 24(13):914–916, 1999.
- [22] D. HAEFLIGER et A. STEMMER : Writing subwavelength-sized structures into aluminium films by thermo-chemical aperture-less near-field optical microscopy. *Ultramicroscopy*, 100(3–4):457–464, 2004.
- [23] S. SUN, K. S. L. CHONG et G. J. LEGGETT : Nanoscale molecular patterns fabricated by using scanning near-field optical lithography. *J. Am. Chem. Soc.*, 124(11):2414–2415, 2002.
- [24] E. BETZIG, M. ISAACSON et A. LEWIS : Collection mode near-field optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 51(25):2088–2090, 1987.
- [25] D. W. POHL et D. COURJON, éditeurs. *Near Field Optics I*, E242, Arc-et-Senans, France (octobre 1992), 1993. NATO Advanced Research Workshop, Kluwer Academic.
- [26] S. JIANG, H. OHSAWA et K. YAMADA : Nanometric scale biosample observation using a photon scanning tunneling microscope. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31(7):2282–2287, 1992.
- [27] M. NAYA, S. MONONOBE, R. U. MAHESWARI, T. SAIKI et M. OHTSU : Imaging of biological samples by a collection-mode photon scanning tunneling microscope with an apertured probe. *Optics Commun.*, 124(1–2):9–15, 1996.
- [28] A. J. MEIXNER et H. KNEPPE : Scanning near-field optical microscopy in cell biology and microbiology. *Cell. Mol. Biol.*, 44(5):673–688, 1998.

- [29] N. F. van HULST, M. F. GARCIA-PARAJO, M. H. P. MOERS, J.-A. VEERMAN et A. G. T. RUITER : Near-field fluorescence imaging of genetic material : Toward the molecular limit. *J. Struct. Biol.*, 119(2):222–231, 1997.
- [30] W. WIEGRÄBE, S. MONAJEMBASHI, H. DITTMAR, K.-O. GREULICH, S. HÄFNER, M. HILDEBRANDT, M. KITTLER, B. LOCHNER et E. UNGER : Scanning near-field optical microscope : a method for investigating chromosomes. *Surf. Interface Anal.*, 25(7-8):510–513, 1997.
- [31] R. WINKLER, B. PERNER, A. RAPP, M. DURM, C. CREMER, K.-O. GREULICH et M. HAUSMANN : Labelling quality and chromosome morphology after low temperature fish analysed by scanning far-field and near-field optical microscopy. *J. Microsc.*, 209(1):23–33, 2003.
- [32] R. M. BAYLIS, S. H. DOAK, M. D. HOLTON et P. R. DUNSTAN : Fluorescence imaging and investigations of directly labelled chromosomes using scanning near-field optical microscopy. *Ultramicroscopy*, 107(4–5):308–312, 2007.
- [33] A. IANOUL, D. D. GRANT, Y. ROULEAU, M. BANI-YAGHOUB, L. J. JOHNSTON et J. P. PEZACK : Imaging nanometer domains of β -adrenergic receptor complexes on the surface of cardiac myocytes. *Nature Chem. Biol.*, 1:196–202, 2005.
- [34] M. BREHM, T. TAUBNER, R. HILLENBRAND et F. KEILMANN : Infrared spectroscopic mapping of single nanoparticles and viruses at nanoscale resolution. *Nano Lett.*, 6(7):1307–1310, 2006.
- [35] E. TREVISAN, E. FABBRETTI, N. MEDIC, B. TROIAN, S. PRATO, F. VITA, G. ZABUCCHI et M. ZWEYER : Novel approaches for scanning near-field optical microscopy imaging of oligodendrocytes in culture. *NeuroImage*, 49(1):517–524, 2010.
- [36] S. RIETI, V. MANNI, A. LISI, L. GIULIANI, D. SACCO, E. D’EMILIA, A. CRICENTI, R. GENEROSI, M. LUCE et S. GRIMALDI : SNOM and AFM microscopy techniques to study the effect of non-ionizing radiation on the morphological and biochemical properties of human keratinocytes cell line (HaCat). *J. Microsc.*, 213(1):20–28, 2004.
- [37] T. ENDERLE, T. HA, D. CHEMLA et S. WEISS : Near-field fluorescence microscopy of cells. *Ultramicroscopy*, 71(1–4):303–309, 1998.
- [38] P. NAGY, A. JENEI, A. KIRSCH, J. SZOLLOSI, S. DAMJANOVICH et T. JOVIN : Activation-dependent clustering of the erb B2 receptor tyrosine kinase detected by scanning near-field optical microscopy. *J. Cell Sci.*, 112(11):1733–1741, 1999.
- [39] F. de LANGE, A. CAMBI, R. HUIJBENS, B. de BAKKER, W. RENSEN, M. GARCIA-PARAJO, N. van HULST et C. G. FIGDOR : Cell biology beyond the diffraction limit : near-field scanning optical microscopy. *J. Cell Sci.*, 114(23):4153–4160, 2001.
- [40] M. ZWEYER, B. TROIAN, V. SPREAFICO et S. PRATO : SNOM on cell thin sections : observation of jurkat and MDAMB453 cells. *J. Microsc.*, 229(3):440–446, 2008.
- [41] V. SUBRAMANIAM, A. K. KIRSCH et T. M. JOVIN : Cell biological applications of scanning near-field optical microscopy (SNOM). *Cell. Mol. Biol.*, 44(5):689–700, 1998.

- [42] R. C. DUNN, G. R. HOLTOM, L. METS et X. S. XIE : Near-field fluorescence imaging and fluorescence lifetime measurement of light harvesting complexes in intact photosynthetic membranes. *J. Phys. Chem.*, 98(12):3094–3098, 1994.
- [43] A. IANOUL, M. STREET, D. GRANT, J. PEZACKI, R. S. TAYLOR et L. J. JOHNSTON : Near-field scanning fluorescence microscopy study of ion channel clusters in cardiac myocyte membranes. *Biophysical Journal*, 87(5):3525–3535, 2004.
- [44] C. HÖPPENER, J. SIEBRASSE, R. PETERS, U. KUBITSCHECK et A. NABER : High-resolution near-field optical imaging of single nuclear pore complexes under physiological conditions. *Biophys. J*, 88(5):3681–3688, 2005.
- [45] C. HÖPPENER et L. NOVOTNY : Antenna-based optical imaging of single Ca^{2+} transmembrane proteins in liquids. *Nano Lett.*, 8(2):642–646, 2008.
- [46] C. HÖPPENER et L. NOVOTNY : Imaging of membrane proteins using antenna-based optical microscopy. *Nanotechnology*, 19:384012, 2008.
- [47] M. F. GARCIA-PARAJO : Optical antennas focus in on biology. *Nature Photon.*, 2:201–203, 2008.
- [48] R. D. GROBER, T. D. HARRIS, J. K. TRAUTMAN et E. BETZIG : Design and implementation of a low temperature near-field scanning optical microscope. *Rev. Sci. Instrum.*, 65(3):626–631, 1994.
- [49] R. D. GROBER, T. D. HARRIS, J. K. TRAUTMAN, E. BETZIG, W. WEGSCHEIDER, L. PFEIFFER et K. WEST : Optical spectroscopy of a GaAs/AlGaAs quantum wire structure using near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 64(11):1421–1423, 1994.
- [50] E. BETZIG et R. J. CHICHESTER : Single molecules observed by near-field scanning optical microscopy. *Science*, 262:1422–1425, 1993.
- [51] W. E. MOERNER, T. PLAKHOTNIK, T. IRNGARTINGER, U. P. WILD, D. W. POHL et B. HECHT : Near-field optical spectroscopy of individual molecules in solids. *Phys. Rev. Lett.*, 73(20):2764–2767, 1994.
- [52] J. K. TRAUTMAN, J. J. MACKLIN, L. E. BRUSS et E. BETZIG : Near-field spectroscopy of single molecule at room temperature. *Nature*, 369:40–42, 1994.
- [53] X. XIE et R. DUNN : Probing single molecule dynamics. *Science*, 265:46, 1994.
- [54] W. P. AMBROSE, P. M. GOODWIN, J. C. MARTIN et R. A. KELLER : Alterations of single molecule fluorescence lifetimes in near-field optical microscopy. *Science*, 265:364–367, 1994.
- [55] W. E. MOERNER et D. P. FROMM : Methods of single-molecule fluorescence spectroscopy and microscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, 74(8):3597–3619, 2003.
- [56] J. A. VEERMAN, A. M. OTTER, L. KUIPERS et N. F. van HULST : High definition aperture probes for near-field optical microscopy fabricated by focused ion beam milling. *Appl. Phys. Lett.*, 72(24):3115–3117, 1998.

- [57] J. A. VEERMAN, M. F. GARCIA-PARAJÓ, L. KUIPERS et N. F. van HULST : Single molecule mapping of the optical field distribution of probes for near-field microscopy. *J. Microsc.*, 194(2-3):477–482, 1999.
- [58] N. HOSAKA et T. SAIKI : Near-field fluorescence imaging of single molecules with a resolution in the range of 10 nm. *J. Microsc.*, 202(2):362–364, 2001.
- [59] C. HÖPPENER, D. MOLENDÁ, H. FUCHS et A. NABER : Scanning near-field optical microscopy of a cell membrane in liquid. *J. Microsc.*, 210(3):288–293, 2003.
- [60] M. KOOPMAN, B. I. de BAKKER, M. F. GARCIA-PARAJÓ et N. F. van HULST : Shear force imaging of soft samples in liquid using a diving bell concept. *Appl. Phys. Lett.*, 83(24):5083–5085, 2003.
- [61] P. BURGOS, Z. LU, A. IANOUL, C. HNATOVSKY, M.-L. VIRIOT, L. J. JOHNSTON et R. S. TAYLOR : Near-field scanning optical microscopy probes : a comparison of pulled and double-etched bent NSOM probes for fluorescence imaging of biological samples. *J. Microsc.*, 211(1):37–47, 2003.
- [62] P. ANGER, P. BHARADWAJ et L. NOVOTNY : Enhancement and quenching of single-molecule fluorescence. *Phys. Rev. Lett.*, 96:113002, 2006.
- [63] N. HAYAZAWA, Y. INOUE et S. KAWATA : Evanescent field excitation and measurement of dye fluorescence in a metallic probe near-field scanning optical microscope. *J. Microsc.*, 194(2-3):472–476, 1999.
- [64] J. AZOULAY, A. DÉBARRE, A. RICHARD et P. TCHÉNIÓ : Field enhancement and apertureless near-field optical spectroscopy of single molecules. *J. Microsc.*, 194(2-3):486–490, 1999.
- [65] H. F. HAMANN, A. GALLAGHER et D. J. NESBITT : Near-field fluorescence imaging by localized field enhancement near a sharp probe tip. *Appl. Phys. Lett.*, 76(14):1953–1955, 2000.
- [66] T. J. YANG, G. A. LESSARD et S. R. QUAKE : An apertureless near-field microscope for fluorescence imaging. *Appl. Phys. Lett.*, 76(3):378–380, 2000.
- [67] E. J. SÁNCHEZ, L. NOVOTNY et X. S. XIE : Near-field fluorescence microscopy based on two-photon excitation with metal tips. *Phys. Rev. Lett.*, 82:4014–4017, 1999.
- [68] W. P. AMBROSE, P. M. GOODWIN, J. C. MARTIN et R. A. KELLER : Single molecule detection and photochemistry on a surface using near-field optical excitation. *Phys. Rev. Lett.*, 72:160–163, 1994.
- [69] R. X. BIAN, R. C. DUNN, X. S. XIE et P. T. LEUNG : Single molecule emission characteristics in near-field microscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 75:4772–4775, 1995.
- [70] D. PASTRÉ, P. GROSSEL et M. TROYON : Fluorescence imaging in near-field optical microscopy : influence of the molecule excitation rate. *Opt. Commun.*, 156(1–3):92–100, 1998.

- [71] W. TRABESINGER, A. KRAMER, M. KREITER, B. HECHT et U. P. WILD : Single-molecule near-field optical energy transfer microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 81(11):2118–2120, 2002.
- [72] S. KÜHN, U. HAKANSON, L. ROGOBETE et V. SANDOGHDAR : Enhancement of single-molecule fluorescence using a gold nanoparticle as an optical nanoantenna. *Phys. Rev. Lett.*, 97:017402, 2006.
- [73] P. BHARADWAJ et L. NOVOTNY : Spectral dependence of single molecule fluorescence enhancement. *Opt. Express*, 15(21):14266–14274, 2007.
- [74] H. EGHLIDI, K. G. LEE, X.-W. CHEN, S. GÖTZINGER et V. SANDOGHDAR : Resolution and enhancement in nanoantenna-based fluorescence microscopy. *Nano Lett.*, 9(12):4007–4011, 2009.
- [75] C. HÖPPENER, Z. J. LAPIN, P. BHARADWAJ et L. NOVOTNY : Self-similar gold-nanoparticle antennas for a cascaded enhancement of the optical field. *Phys. Rev. Lett.*, 109:017402, 2012.
- [76] M. MIVELLE, T. S. van ZANTEN, L. NEUMANN, N. F. van HULST et M. F. GARCIA-PARAJO : Ultra-bright bowtie nanoaperture antenna probes studied by single molecule fluorescence. *Nano Lett.*, 12:5972–5978, 2012.
- [77] C. MANZO, T. S. van ZANTEN et M. F. GARCIA-PARAJO : Nanoscale fluorescence correlation spectroscopy on intact living cell membranes with NSOM probes. *Biophys. J.*, 100(2):L8–L10, 2011.
- [78] D. P. TSAI, A. OTHONOS, M. MOSKOVITS et D. UTTAMCHANDANI : Raman spectroscopy using a fiber optic probe with subwavelength aperture. *Appl. Phys. Lett.*, 64(14):1768–1770, 1994.
- [79] C. L. JAHNCKE, M. A. PAESLER et H. D. HALLEN : Raman imaging with near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 67(17):2483–2485, 1995.
- [80] J. PRIKULIS, K. V. G. K. MURTY, H. OLIN et M. KÄLL : Large-area topography analysis and near-field Raman spectroscopy using bent fibre probes. *J. Microsc.*, 210(3):269–273, 2003.
- [81] P. G. GUCCIARDI, S. TRUSSO, C. VASI, S. PATANÈ et M. ALLEGRINI : Near-field Raman imaging of morphological and chemical defects in organic crystals with subdiffraction resolution. *J. Microsc.*, 209(3):228–235, 2003.
- [82] M. MOSKOVITS : Surface-enhanced spectroscopy. *Rev. Mod. Phys.*, 57:783–826, 1985.
- [83] E. LE RU et P. ETCHEGOIN : *Principles of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy And Related Plasmonic Effects*. 2008.
- [84] S. NIE et S. R. EMORY : Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering. *Science*, 275(5303):1102–1106, 1997.
- [85] J. WESSEL : Surface-enhanced optical microscopy. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2(9):1538–1541, 1985.

- [86] R. M. STOCKLE, Y. D. SUH, V. DECKERT et R. ZENOBI : Nanoscale chemical analysis by tip-enhanced Raman spectroscopy. *Chem. Phys. Lett.*, 318:131–136, 2000.
- [87] N. HAYAZAWA, Y. INOUE, Z. SEKKAT et S. KAWATA : Metallized tip amplification of near-field Raman scattering. *Opt. Commun.*, 183:333–336, 2000.
- [88] M. S. ANDERSON : Locally enhanced Raman spectroscopy with an atomic force microscope. *Appl. Phys. Lett.*, 76(21):3130–3132, 2000.
- [89] H. WATANABE, Y. ISHIDA, N. HAYAZAWA, Y. INOUE et S. KA : Tip-enhanced near-field Raman analysis of tip-pressurized adenine molecule. *Phys. Rev. B*, 69:155418, 2004.
- [90] B. PETTINGER, G. PICARDI, R. SCHUSTER et G. ERTL : Surface-enhanced and STM tip-enhanced Raman spectroscopy of CN^- ions at gold surfaces. *J. Electroanal. Chem.*, 554–555(0):293–299, 2003.
- [91] C. NEACSU, G. STEUDLE et M. RASCHKE : Plasmonic light scattering from nanoscopic metal tips. *Appl. Phys. B*, 80:295–300, 2005.
- [92] D. MEHTANI, N. LEE, R. D. HARTSCHUH, A. KISLIUK, M. D. FOSTER, A. P. SOKOLOV, F. CAJKO et I. TSUKERMAN : Optical properties and enhancement factors of the tips for apertureless near-field optics. *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.*, 8(4):S183, 2006.
- [93] R. WANG, J. WANG, F. HAO et Q. TIAN : White-light total internal reflection microscopy for characterizing the optical properties of Ag-coated optical fiber tips. *Appl. Opt.*, 49(20):3905–3908, 2010.
- [94] T. W. JOHNSON, Z. J. LAPIN, R. BEAMS, N. C. LINDQUIST, S. G. RODRIGO, L. NOVOTNY et S.-H. OH : Highly reproducible near-field optical imaging with sub-20-nm resolution based on template-stripped gold pyramids. *ACS Nano*, 6(10):9168–9174, 2012.
- [95] J. STEIDTNER et B. PETTINGER : Tip-enhanced Raman spectroscopy and microscopy on single dye molecules with 15 nm resolution. *Phys. Rev. Lett.*, 100:236101, 2008.
- [96] M. D. SONNTAG, J. M. KLINGSPORN, L. K. GARIBAY, J. M. ROBERTS, J. A. DIERINGER, T. SEIDEMAN, K. A. SCHEIDT, L. JENSEN, G. C. SCHATZ et R. P. VAN DUYN : Single-molecule tip-enhanced Raman spectroscopy. *J. Phys. Chem. C*, 116(1):478–483, 2012.
- [97] W. X. SUN et Z. X. SHEN : Apertureless near-field scanning Raman microscopy using reflection scattering geometry. *Ultramicroscopy*, 94:237–244, 2003.
- [98] J. STADLER, T. SCHMID et R. ZENOBI : Nanoscale chemical imaging using top-illumination tip-enhanced Raman spectroscopy. *Nano Lett.*, 10(11):4514–4520, 2010.
- [99] N. MISHRA et G. KUMAR : Near-field optical analysis of plasmonic nano-probes for top-illumination tip-enhanced Raman scattering. *Plasmonics*, 7:359–367, 2012.
- [100] B.-S. YEO, J. STADLER, T. SCHMID, R. ZENOBI et W. ZHANG : Tip-enhanced Raman spectroscopy – its status, challenges and future directions. *Chem. Phys. Lett.*, 472(1–3):1–13, 2009.

- [101] S. BLAIZE, S. AUBERT, A. BRUYANT, R. BACHELOT, G. LERONDEL, P. ROYER, J.-E. BROQUIN et V. MINIER : Apertureless scanning near-field optical microscopy for ion exchange channel waveguide characterization. *J. Microsc.*, 209(3):155–161, 2003.
- [102] D. P. TSAI, H. E. JACKSON, R. C. REDDICK, S. H. SHARP et R. J. WARMACK : Photon scanning tunneling microscope study of optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 56(16): 1515–1517, 1990.
- [103] E. BOURILLOT, F. de FORNEL, J. P. GOUDONNET, D. PERSEGOL, A. KEVORKIAN et D. DELACOURT : Analysis of photon-scanning tunneling microscope images of inhomogeneous samples : determination of the local refractive index of channel waveguides. *J. Opt. Soc. Am. A*, 12(1):95–106, 1995.
- [104] G. H. V. RHODES, B. B. GOLDBERG, M. S. ÜNLÜ, S. T. CHU, W. PAN, T. KANEKO, Y. KOKOBUN et B. E. LITTLE : Measurement of internal spatial modes and local propagation properties in optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 75(16):2368–2370, 1999.
- [105] R. QUIDANT, J.-C. WEEBER, A. DEREUX, D. PEYRADE, G. Colas des FRANCS, C. GIRARD et Y. CHEN : Addressing and imaging high optical index dielectric ridges in the optical near field. *Phys. Rev. E*, 64:066607, 2001.
- [106] A. G. CHOO, H. E. JACKSON, U. THIEL, G. N. D. BRABANDER et J. T. BOYD : Near field measurements of optical channel waveguides and directional couplers. *Appl. Phys. Lett.*, 65(8):947–949, 1994.
- [107] H. E. JACKSON, S. M. LINDSAY, C. D. POWELEIT, D. H. NAGHSKI, G. N. D. BRABANDER et J. T. BOYD : Near field measurements of optical channel waveguide structures. *Ultramicroscopy*, 61(1–4):295–298, 1995.
- [108] R. CELLA, B. MERSALI, A. BRUNO, S. DAVY, H. BRÜCKNER et C. LICOPPE : Imaging of the optical mode of waveguiding devices by scanning near-field optical microscopy. *J. Appl. Phys.*, 78(7):4339–4344, 1995.
- [109] S. BOURZEIX, J. M. MOISON, F. MIGNARD, F. BARTHE, A. C. BOCCARA, C. LICOPPE, B. MERSALI, M. ALLOVON et A. BRUNO : Near-field optical imaging of light propagation in semiconductor waveguide structures. *Appl. Phys. Lett.*, 73(8):1035–1037, 1998.
- [110] C. D. POWELEIT, D. H. NAGHSKI, S. M. LINDSAY, J. T. BOYD et H. E. JACKSON : Near field scanning optical microscopy measurements of optical intensity distributions in semiconductor channel waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 69(23):3471–3473, 1996.
- [111] K. FOUBERT, L. LALOUAT, B. CLUZEL, E. PICARD, D. PEYRADE, E. DELAMADELEINE, F. de FORNEL et E. HADJI : Near-field modal microscopy of subwavelength light confinement in multimode silicon slot waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 93(25):251103, 2008.
- [112] A. L. CAMPILLO, J. W. P. HSU, C. A. WHITE et C. D. W. JONES : Direct measurement of the guided modes in LiNbO₃ waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 80(13):2239–2241, 2002.
- [113] P. K. TIEN : Integrated optics and new wave phenomena in optical waveguides. *Rev. Mod. Phys.*, 49:361–420, 1977.

- [114] S. I. BOZHEVOLNYI, V. S. VOLKOV, T. SØNDERGAARD, A. BOLTASSEVA, P. I. BOREL et M. KRISTENSEN : Near-field imaging of light propagation in photonic crystal waveguides : Explicit role of Bloch harmonics. *Phys. Rev. B*, 66:235204, 2002.
- [115] M. VAEZ-IRAVANI et R. TOLEDO-CROW : Phase contrast and amplitude pseudoheterodyne interference near field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 62(10):1044–1046, 1993.
- [116] A. NESCI, R. DÄNDLIKER et H. P. HERZIG : Quantitative amplitude and phase measurement by use of a heterodyne scanning near-field optical microscope. *Opt. Lett.*, 26(4):208–210, 2001.
- [117] P. L. PHILLIPS, J. C. KNIGHT, J. M. POTTAGE, G. KAKARANTZAS et P. S. J. RUSSELL : Direct measurement of optical phase in the near field. *Appl. Phys. Lett.*, 76(5):541–543, 2000.
- [118] M. L. M. BALISTRERI, J. P. KORTERIK, L. KUIPERS et N. F. van HULST : Local observations of phase singularities in optical fields in waveguide structures. *Phys. Rev. Lett.*, 85:294–297, 2000.
- [119] M. L. M. BALISTRERI, J. P. KORTERIK, L. KUIPERS et N. F. van HULST : Visualization of mode transformation in a planar waveguide splitter by near-field optical phase imaging. *Appl. Phys. Lett.*, 79(7):910–912, 2001.
- [120] I. STEFANON, S. BLAIZE, A. BRUYANT, S. AUBERT, G. LERONDEL, R. BACHELOT et P. ROYER : Heterodyne detection of guided waves using a scattering-type scanning near-field optical microscope. *Opt. Express*, 13(14):5553, 2005.
- [121] M. L. M. BALISTRERI, H. GERSEN, J. P. KORTERIK, L. KUIPERS et N. F. van HULST : Tracking femtosecond laser pulses in space and time. *Science*, 294:1080–1082, 2001.
- [122] H. GERSEN, J. P. KORTERIK, N. F. van HULST et L. KUIPERS : Tracking ultrashort pulses through dispersive media : Experiment and theory. *Phys. Rev. E*, 68:026604, 2003.
- [123] H. GERSEN, E. M. H. P. van DIJK, J. P. KORTERIK, N. F. van HULST et L. KUIPERS : Phase mapping of ultrashort pulses in bimodal photonic structures : A window on local group velocity dispersion. *Phys. Rev. E*, 70:066609, 2004.
- [124] E. FLÜCK, M. HAMMER, A. M. OTTER, J. P. KORTERIK, L. KUIPERS et N. F. van HULST : Amplitude and phase evolution of optical fields inside periodic photonic structures. *J. Lightwave Technol.*, 21(5):1384–1393, 2003.
- [125] H. GERSEN, D. J. W. KLUNDER, J. P. KORTERIK, A. DRIESSEN, N. F. van HULST et L. KUIPERS : Propagation of a femtosecond pulse in a microresonator visualized in time. *Opt. Lett.*, 29(11):1291–1293, 2004.
- [126] E. DESCROVI, T. SFEZ, L. DOMINICI, W. NAKAGAWA, F. MICHELOTTI, F. GIORGIS et H.-P. HERZIG : Near-field imaging of Bloch surface waves on silicon nitride one-dimensional photonic crystals. *Opt. Express*, 16(8):5453–5464, 2008.

- [127] E. DESCROVI, T. SFEZ, M. QUAGLIO, D. BRUNAZZO, L. DOMINICI, F. MICHELOTTI, H. P. HERZIG, O. J. F. MARTIN et F. GIORGIS : Guided Bloch surface waves on ultrathin polymeric ridges. *Nano Lett.*, 10(6):2087–2091, 2010.
- [128] T. SFEZ, E. DESCROVI, L. YU, M. QUAGLIO, L. DOMINICI, W. NAKAGAWA, F. MICHELOTTI, F. GIORGIS et H. P. HERZIG : Two-dimensional optics on silicon nitride multilayer : Refraction of Bloch surface waves. *Appl. Phys. Lett.*, 96(15):151101, 2010.
- [129] S. I. BOZHEVOLNYI et L. KUIPERS : Near-field characterization of photonic crystal waveguides. *Semicond. Sci. Technol.*, 21(5):R1, 2006.
- [130] E. B. MCDANIEL, J. W. P. HSU, L. S. GOLDNER, R. J. TONUCCI, E. L. SHIRLEY et G. W. BRYANT : Local characterization of transmission properties of a two-dimensional photonic crystal. *Phys. Rev. B*, 55:10878–10882, 1997.
- [131] P. L. PHILLIPS, J. C. KNIGHT, B. J. MANGAN, P. S. J. RUSSELL, M. D. B. CHARLTON et G. J. PARKER : Near-field optical microscopy of thin photonic crystal films. *J. Appl. Phys.*, 85(9):6337–6342, 1999.
- [132] I. I. SMOLYANINOV, W. ATIA et C. C. DAVIS : Near-field optical microscopy of two-dimensional photonic and plasmonic crystals. *Phys. Rev. B*, 59:2454–2460, 1999.
- [133] D. MULIN, M. SPAJER, D. COURJON, F. CARCENAC et Y. CHEN : Near-field probing control of optical propagation in bidimensional guiding mesostructures. *J. Appl. Phys.*, 87(1):534–537, 2000.
- [134] A. L. CAMPILLO, J. W. P. HSU, C. A. WHITE et A. ROSENBERG : Mapping the optical intensity distribution in photonic crystals using a near-field scanning optical microscope. *J. Appl. Phys.*, 89(5):2801–2807, 2001.
- [135] S. I. BOZHEVOLNYI, V. S. VOLKOV, J. ARENTOFT, A. BOLTASSEVA, T. SØNDERGAARD et M. KRISTENSEN : Direct mapping of light propagation in photonic crystal waveguides. *Opt. Commun.*, 212(1–3):51–55, 2002.
- [136] M.-P. BERNAL, N. COURJAL, J. AMET, M. ROUSSEY et C. H. HOU : Lithium niobate photonic crystal waveguides : far field and near field characterisation. *Opt. Commun.*, 265:180, 2006.
- [137] V. S. VOLKOV, S. I. BOZHEVOLNYI, E. DEVAUX, J.-Y. LALUET et T. W. EBBESEN : Wavelength selective nanophotonic components utilizing channel plasmon polaritons. *Nano Lett.*, 7(4):880–884, 2007.
- [138] E. FLÜCK, N. F. van HULST, W. L. VOS et L. KUIPERS : Near-field optical investigation of three-dimensional photonic crystals. *Phys. Rev. E*, 68:015601(R), 2003.
- [139] P. KRAMPER, M. AGIO, C. M. SOUKOULIS, A. BIRNER, F. MÜLLER, R. B. WEHRSPHON, U. GÖSELE et V. SANDOGHDAR : Highly directional emission from photonic crystal waveguides of subwavelength width. *Phys. Rev. Lett.*, 92:113903, 2004.
- [140] B. CLUZEL, D. GÉRARD, E. PICARD, T. CHARVOLIN, V. CALVO, E. HADJI et F. de FORNEL : Experimental demonstration of Bloch mode parity change in photonic crystal waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 85(14):2682–2684, 2004.

- [141] H. GERSEN, T. J. KARLE, R. J. P. ENGELEN, W. BOGAERTS, J. P. KORTERIK, N. F. van HULST, T. F. KRAUSS et L. KUIPERS : Direct observation of Bloch harmonics and negative phase velocity in photonic crystal waveguides. *Phys. Rev. Lett.*, 94:123901, 2005.
- [142] T. SFEZ, E. DESCROVI, L. DOMINICI, W. NAKAGAWA, F. MICHELOTTI, F. GIORGIS et H.-P. HERZIG : Near-field analysis of surface electromagnetic waves in the bandgap region of a polymeric grating written on a one-dimensional photonic crystal. *Appl. Phys. Lett.*, 93(6):061108, 2008.
- [143] D. GÉRARD, L. BERGUIGA, F. de FÖRNEL, L. SALOMON, C. SEASSAL, X. LETARTRE, P. ROJO-ROMEO et P. VIKTOROVITCH : Near-field probing of active photonic-crystal structures. *Opt. Lett.*, 27(3):173–175, 2002.
- [144] P. KRAMPER, M. KAFESAKI, C. M. SOUKOULIS, A. BIRNER, F. MÜLLER, U. GÖSELE, R. B. WEHRSPÖHN, J. MLYNEK et V. SANDOGHDAR : Near-field visualization of light confinement in a photonic crystal microresonator. *Opt. Lett.*, 29(2):174–176, 2004.
- [145] N. LOUVION, D. GÉRARD, J. MOUETTE, F. de FÖRNEL, C. SEASSAL, X. LETARTRE, A. RAHMANI et S. CALLARD : Local observation and spectroscopy of optical modes in an active photonic-crystal microcavity. *Phys. Rev. Lett.*, 94:113907, 2005.
- [146] B. CLUZEL, D. GERARD, E. PICARD, T. CHARVOLIN, F. DE FÖRNEL et E. HADJI : Subwavelength imaging of field confinement in a waveguide-integrated photonic crystal cavity. *J. Appl. Phys.*, 98(8):086109–086109–3, 2005.
- [147] L. LALOUAT, B. CLUZEL, C. DUMAS, L. SALOMON et F. de FÖRNEL : Imaging photoexcited optical modes in photonic-crystal cavities with a near-field probe. *Phys. Rev. B*, 83:115326, 2011.
- [148] K. OKAMOTO, M. LONČAR, T. YOSHIE, A. SCHERER, Y. QIU et P. GOGNA : Near-field scanning optical microscopy of photonic crystal nanocavities. *Appl. Phys. Lett.*, 82(11):1676–1678, 2003.
- [149] N. LOUVION, A. RAHMANI, C. SEASSAL, S. CALLARD, D. GÉRARD et F. de FÖRNEL : Near-field observation of subwavelength confinement of photoluminescence by a photonic crystal microcavity. *Opt. Lett.*, 31(14):2160–2162, 2006.
- [150] L. LALOUAT, B. CLUZEL, P. VELHA, E. PICARD, D. PEYRADE, J. P. HUGONIN, P. LALLANNE, E. HADJI et F. de FÖRNEL : Near-field interactions between a subwavelength tip and a small-volume photonic-crystal nanocavity. *Phys. Rev. B*, 76:041102, 2007.
- [151] G. L. GAC, A. RAHMANI, C. SEASSAL, E. PICARD, E. HADJI et S. CALLARD : Tuning of an active photonic crystal cavity by an hybrid silica/silicon near-field probe. *Opt. Express*, 17(24):21672–21679, 2009.
- [152] T. GROSJEAN, A. E. ETER, M. MIVELLE, T.-P. VO, A. BELKHIR, C. ECOFFEY, G. L. GAC, D. NEDELJKOVIC, A. RAHMANI, C. SEASSAL, S. CALLARD et F. BAIDA : Extraordinary blueshift of a photonic crystal nanocavity by reducing its mode volume with an opaque microtip. *Appl. Phys. Lett.*, 101(5):051102, 2012.

- [153] A. F. KOENDERINK, M. KAFESAKI, B. C. BUCHLER et V. SANDOGHDAR : Controlling the resonance of a photonic crystal microcavity by a near-field probe. *Phys. Rev. Lett.*, 95:153904, 2005.
- [154] S. VIGNOLINI, F. INTONTI, F. RIBOLI, L. BALET, L. H. LI, M. FRANCARDI, A. GERARDINO, A. FIORE, D. S. WIERSMA et M. GURIOLI : Magnetic imaging in photonic crystal microcavities. *Phys. Rev. Lett.*, 105:123902, 2010.
- [155] M. BURRESI, T. KAMPFRATH, D. van OOSTEN, J. C. PRANGSMA, S. SONG, B. S. NODA et L. KUIPERS : Magnetic light-matter interactions in a photonic crystal nanocavity. *Phys. Rev. Lett.*, 105:123901, 2010.
- [156] I. MÄRKI, M. SALT et H. P. HERZIG : Tuning the resonance of a photonic crystal microcavity with an AFM probe. *Opt. Express*, 14(7):2969–2978, 2006.
- [157] W. C. L. HOPMAN, K. O. van der WERF, A. J. F. HOLLINK, W. BOGAERTS, V. SUBRAMANIAM et R. M. de RIDDER : Nano-mechanical tuning and imaging of a photonic crystal micro-cavity resonance. *Opt. Express*, 14(19):8745–8752, 2006.
- [158] A. V. ZAYATS, I. I. SMOLYANINOV et A. A. MARADUDIN : Nano-optics of surface plasmon polaritons. *Phys. Rep.*, 408(3–4):131–314, 2005.
- [159] A. OTTO : *Z. Phys.*, 216:398, 1968.
- [160] D. BARCHIESI et A. OTTO : Excitations of surface plasmon polaritons by attenuated total reflection, revisited. *Riv. Nuovo Cimento*, 36(5):173–209, 2013.
- [161] B. HECHT, H. BIELEFELDT, L. NOVOTNY, Y. INOUE et D. W. POHL : Local excitation, scattering, and interference of surface plasmons. *Phys. Rev. Lett.*, 77:1889–1892, 1996.
- [162] M. SPECHT, J. D. PEDARNIG, W. M. HECKL et T. W. HÄNSCH : Scanning plasmon near-field microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 68:476–479, 1992.
- [163] F. KEILMANN et R. HILLENBRAND : Near-field microscopy by elastic light scattering from a tip. *Phil. Trans. R. Soc. of Lond. A*, 362(1817):787–805, 2004.
- [164] S. I. BOZHEVOLNYI et B. VOHNSEN : Near-field optics with uncoated fiber tips :light confinement and spatial resolution. *J. Opt. Soc. Am. B*, 14(7):1656–1663, 1997.
- [165] E. KRETSCHMANN et H. RAETHER : *Z. Naturforsch.*, 23a:2135, 1968.
- [166] O. MARTI, H. BIELEFELDT, B. HECHT, S. HERMINGHAUS, P. LEIDERER et J. MLYNEK : Near-field optical measurement of the surface plasmon field. *Opt. Commun.*, 96(4–6):225–228, 1993.
- [167] P. M. ADAM, L. SALOMON, F. de FORNEL et J. P. GOUDONNET : Determination of the spatial extension of the surface-plasmon evanescent field of a silver film with a photon scanning tunneling microscope. *Phys. Rev. B*, 48:2680–2683, Jul 1993.
- [168] P. DAWSON, F. de FORNEL et J. P. GOUDONNET : Imaging of surface plasmon propagation and edge interaction using a photon scanning tunneling microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 72(18):2927–2930, 1994.

- [169] U. C. FISCHER et D. W. POHL : Observation of single-particle plasmons by near-field optical microscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 62:458–461, 1989.
- [170] P.-M. ADAM, S. BENREZZAK, J. L. BIJEON et P. ROYER : Localized surface plasmons on nanometric gold particles observed with an apertureless scanning near-field optical microscope. *J. Appl. Phys.*, 88(11):6919–6921, 2000.
- [171] D. P. TSAI, J. KOVACS, Z. WANG, M. MOSKOVITS, V. M. SHALAEV, J. S. SUH et R. BOTET : Photon scanning tunneling microscopy images of optical excitations of fractal metal colloid clusters. *Phys. Rev. Lett.*, 72:4149–4152, 1994.
- [172] J. R. KRENN, W. GOTSCHY, D. SOMITSCH, A. LEITNER et F. R. AUSSENEGG : Investigation of localized surface plasmons with the photon scanning tunneling microscope. *Appl. Phys. Lett. A*, 61(5):541–545, 1995.
- [173] I. I. SMOLYANINOV, D. L. MAZZONI, J. MAIT et C. C. DAVIS : Experimental study of surface-plasmon scattering by individual surface defects. *Phys. Rev. B*, 56:1601–1611, 1997.
- [174] A. BOUHELIER, T. HUSER, H. TAMARU, H.-J. GÜNTHERODT, D. W. POHL, F. I. BAIDA et D. VAN LABEKE : Plasmon optics of structured silver films. *Phys. Rev. B*, 63:155404, 2001.
- [175] H. L. OFFERHAUS, B. van den BERGEN, M. ESCALANTE, F. B. SEGERINK, J. P. KORTERIK et N. F. van HULST : Creating focused plasmons by noncollinear phasematching on functional gratings. *Nano Letters*, 5(11):2144–2148, 2005.
- [176] M. SANDTKE, R. J. P. ENGELEN, H. SCHOENMAKER, I. ATTEMA, H. DEKKER, I. CERJAK, J. P. KORTERIK, F. B. SEGERINK et L. KUIPERS : Novel instrument for surface plasmon polariton tracking in space and time. *Rev. Sci. Instrum.*, 79(1):013704, 2008.
- [177] J.-C. WEEBER, J. R. KRENN, A. DEREUX, B. LAMPRECHT, Y. LACROUTE et J. P. GOUDONNET : Near-field observation of surface plasmon polariton propagation on thin metal stripes. *Phys. Rev. B*, 64:45411, 2001.
- [178] B. LAMPRECHT, J. R. KRENN, G. SCHIDER, H. DITLBACHER, M. SALERNO, N. FELIDJ, A. LEITNER, F. R. AUSSENEGG et J. C. WEEBER : Surface plasmon propagation in microscale metal stripes. *Appl. Phys. Lett.*, 79(1):51–53, 2001.
- [179] H. DITLBACHER, J. R. KRENN, N. FELIDJ, B. LAMPRECHT, G. SCHIDER, M. SALERNO, A. LEITNER et F. R. AUSSENEGG : Fluorescence imaging of surface plasmon fields. *Appl. Phys. Lett.*, 80(3):404–406, 2002.
- [180] H. DITLBACHER, J. R. KRENN, G. SCHIDER, A. LEITNER et F. R. AUSSENEGG : Two-dimensional optics with surface plasmon polaritons. *Appl. Phys. Lett.*, 81(10):1762–1764, 2002.
- [181] J.-C. WEEBER, Y. LACROUTE, A. DEREUX, E. DEVAUX, T. EBBESEN, C. GIRARD, M. U. GONZÁLEZ et A.-L. BAUDRION : Near-field characterization of bragg mirrors engraved in surface plasmon waveguides. *Phys. Rev. B*, 70:235406, 2004.

- [182] S. I. BOZHEVOLNYI, V. S. VOLKOV, E. DEVAUX, J.-Y. LALUET et T. W. EBBESEN : Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators. *Nature*, 440:508–511, 2006.
- [183] M. U. GONZÁLEZ, J.-C. WEEBER, A.-L. BAUDRION, A. DEREUX, A. L. STEPANOV, J. R. KRENN, E. DEVAUX et T. W. EBBESEN : Design, near-field characterization, and modeling of 45° surface-plasmon bragg mirrors. *Phys. Rev. B*, 73:155416, 2006.
- [184] V. S. VOLKOV, S. I. BOZHEVOLNYI, L. H. FRANDBSEN et M. KRISTENSEN : Direct observation of surface mode excitation and slow light coupling in photonic crystal waveguides. *Nano Lett.*, 7(8):2341–2345, 2007.
- [185] J.-Y. LALUET, E. DEVAUX, C. GENET, T. W. EBBESEN, J.-C. WEEBER et A. DEREUX : Optimization of surface plasmons launching from subwavelength hole arrays : modelling and experiments. *Opt. Express*, 15(6):3488–3495, 2007.
- [186] Q. WANG, J. BU et X.-C. YUAN : High-resolution 2D plasmonic fan-out realized by subwavelength slit arrays. *Opt. Express*, 18(3):2662–2667, 2010.
- [187] Z. LIU, J. M. STEELE, W. SRITURAVANICH, Y. PIKUS, C. SUN et X. ZHANG : Focusing surface plasmons with a plasmonic lens. *Nano Letters*, 5(9):1726–1729, 2005.
- [188] Y. FU, Y. LIU, X. ZHOU, Z. XU et F. FANG : Experimental investigation of superfocusing of plasmonic lens with chirped circular nanoslits. *Opt. Express*, 18(4):3438–3443, 2010.
- [189] A. LIU, G. RUI, X. REN, Q. ZHAN, G. GUO et G. GUO : Encoding photonic angular momentum information onto surface plasmon polaritons with plasmonic lens. *Opt. Express*, 20(22):24151–24159, 2012.
- [190] W. CHEN, G. RUI, D. C. ABEYSINGHE, R. L. NELSON et Q. ZHAN : Hybrid spiral plasmonic lens : towards an efficient miniature circular polarization analyzer. *Opt. Express*, 20(24):26299–26307, 2012.
- [191] L. YIN, V. K. VLASKO-VLASOV, A. RYDH, J. PEARSON, U. WELP, S.-H. CHANG, S. K. GRAY, G. C. SCHATZ, D. B. BROWN et C. W. KIMBALL : Surface plasmons at single nanoholes in Au films. *Appl. Phys. Lett.*, 85(3):467–469, 2004.
- [192] T. RINDZEVICIUS, Y. ALAVERDYAN, B. SEPULVEDA, T. PAKIZEH, M. KÄLL, R. HILLENBRAND, J. AIZPURUA et F. J. García de ABAJO : Nanohole plasmons in optically thin gold films. *J. Phys. Chem. C*, 111(3):1207–1212, 2007.
- [193] E.-S. KWAK, J. HENZIE, S.-H. CHANG, STEPHEN, K. GRAY, G. C. SCHATZ et T. W. ODOM : Surface plasmon standing waves in large-area subwavelength hole arrays. *Nano Lett.*, 5(10):1963–1967, 2005.
- [194] H. GAO, J. HENZIE et T. W. ODOM : Direct evidence for surface plasmon-mediated enhanced light transmission through metallic nanohole arrays. *Nano Letters*, 6(9):2104–2108, 2006.
- [195] J. E. HALL, G. P. WIEDERRECHT, S. K. GRAY, S.-H. CHANG, S. JEON, J. A. ROGERS, R. BACHELOT et P. ROYER : Heterodyne apertureless near-field scanning optical microscopy on periodic gold nanowells. *Opt. Express*, 15(7):4098–4105, 2007.

- [196] M. MREJEN, A. ISRAEL, H. TAHA, M. PALCHAN et A. LEWIS : Near-field characterization of extraordinary optical transmission in sub-wavelength aperture arrays. *Opt. Express*, 15(15):9129–9138, 2007.
- [197] N. YU, E. CUBUKCU, L. DIEHL, M. A. BELKIN, K. B. CROZIER, F. CAPASSO, D. BOUR, S. CORZINE et G. HÖFLER : Plasmonic quantum cascade laser antenna. *Appl. Phys. Lett.*, 91(17):173113, 2007.
- [198] R. M. BAKKER, A. BOLTASSEVA, Z. LIU, R. H. PEDERSEN, S. GRESILLON, A. V. KILDISHEV, V. P. DRACHEV et V. M. SHALAEV : Near-field excitation of nanoantenna resonance. *Opt. Express*, 15(21):13682–13688, 2007.
- [199] R. L. OLMON, P. M. KRENZ, A. C. JONES, G. D. BOREMAN et M. B. RASCHKE : Near-field imaging of optical antenna modes in the mid-infrared. *Opt. Express*, 16(25):20295–20305, 2008.
- [200] M. SCHNELL, A. GARCÍA-ETXARRI, A. J. HUBER, K. CROZIER, J. AIZPURUA et R. HILLENBRAND : Controlling the near-field oscillations of loaded plasmonic nanoantennas. *Nature Photon.*, 3:287–291, 2009.
- [201] F. BONACCORSO, Z. SUN, T. HASAN et A. C. FERRARI : Graphene photonics and optoelectronics. *Nature Photon.*, 4(9):611–622, 2010.
- [202] A. N. GRIGORENKO, M. POLINI et K. S. NOVOSELOV : Graphene plasmonics. *Nature Photon.*, 6(11):749–758, 2012.
- [203] Q. BAO et K. P. LOH : Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices. *ACS Nano*, 6(5):3677–3694, 2012.
- [204] P. TASSIN, T. KOSCHNY, M. KAFESAKI et C. M. SOUKOULIS : A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics. *Nature Photon.*, 6(4):259–264, 2012.
- [205] L. JU, B. GENG, J. HORNG, C. GIRIT, M. MARTIN, Z. HAO, H. A. BECHTEL, X. LIANG, A. ZETTL, Y. R. SHEN et F. WANG : Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials. *Nature Nanotech.*, 6(10):630–634, 2011.
- [206] Z. FEI, G. O. ANDREEV, W. BAO, L. M. ZHANG, A. S. MCLEOD, C. WANG, M. K. STEWART, Z. ZHAO, G. DOMINGUEZ, M. THIEMENS, M. M. FOGLER, M. J. TAUBER, A. H. CASTRO-NETO, C. N. LAU, F. KEILMANN et D. N. BASOV : Infrared nanoscopy of dirac plasmons at the graphene-SiO₂ interface. *Nano Lett.*, 11(11):4701–4705, 2011.
- [207] N. OCELIC, A. HUBER et R. HILLENBRAND : Pseudoheterodyne detection for background-free near-field spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 89(10):101124, 2006.
- [208] Z. FEI, A. S. RODIN, G. O. ANDREEV, W. BAO, A. S. MCLEOD, M. WAGNER, L. M. ZHANG, Z. ZHAO, M. THIEMENS, G. DOMINGUEZ, M. M. FOGLER, A. H. C. NETO, C. N. LAU, F. KEILMANN et D. N. BASOV : Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging. *Nature*, 487:82–85, 2012.

- [209] J. CHEN, M. BADIOLI, P. ALONSO-GONZÁLEZ, S. THONGRATTANASIRI, F. HUTH, J. OS-MOND, M. SPASENOVIC, A. CENTENO, A. PESQUERA, P. GODIGNON, A. Z. ELORZA, N. CAMARA, F. J. G. de ABAJO, R. HILLENBRAND et F. H. L. KOPPENS : Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons. *Nature*, 487:77–81, 2012.
- [210] F. CAPOLINO : *Theory and Phenomena of Metamaterials*. CRC Press Inc., 2009.
- [211] A. A. MARADUDIN : *Structured Surfaces as Optical Metamaterials*. Cambridge University Press, 2011.
- [212] J. B. PENDRY : Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.*, 85:3966–3969, 2000.
- [213] R. MOERLAND, N. van HULST, H. GERSEN et L. KUIPERS : Probing the negative permittivity perfect lens at optical frequencies using near-field optics and single molecule detection. *Opt. Express*, 13(5):1604–1614, 2005.
- [214] Y. POUJET, M. ROUSSEY, J. SALVI, F. I. BAIDA, D. VAN LABEKE, A. PERENTES, C. SANTSCHI et P. HOFFMANN : Super-transmission of light through subwavelength annular apertures arrays in metallic films : spectral analysis and near-field optical images in the visible range. *Photonics Nanostruct.*, 4:47–56, 2006.
- [215] Y. POUJET, J. SALVI, F. I. BAIDA, D. VAN LABEKE, A. PERENTES, C. SANTSCHI et P. HOFFMANN : Near-field optical images of subwavelength annular aperture arrays exhibiting an extraordinary transmission. *J. Microsc.*, 229(2):203–209, 2008.
- [216] S. M. ORBONS, D. FREEMAN, B. LUTHER-DAVIES, B. C. GIBSON, S. T. HUNTINGTON, D. N. JAMIESON et A. ROBERTS : Optical properties of silver composite metamaterials. *Physica B*, 394:176–179, 2007.
- [217] T. ZENTGRAF, J. DORFMÜLLER, C. ROCKSTUHL, C. ETRICH, R. VOGELGESANG, K. KERN, T. PERTSCH, F. LEDERER et H. GIESSEN : Amplitude- and phase-resolved optical near fields of split-ring-resonator-based metamaterials. *Opt. Lett.*, 33(8):848–850, 2008.
- [218] D. DIESEL, M. DECKER, S. LINDEN et M. WEGENER : Near-field optical experiments on low-symmetry split-ring-resonator arrays. *Opt. Lett.*, 35(21):3661–3663, 2010.
- [219] T. S. KAO, F. M. HUANG, Y. CHEN, E. T. F. ROGERS et N. I. ZHELUDEV : Metamaterial as a controllable template for nanoscale field localization. *Appl. Phys. Lett.*, 96(4):041103, 2010.
- [220] A. NDAO, Q. VAGNE, J. SALVI et F. I. BAIDA : Polarization sensitive sub-wavelength metallic structures : toward near-field light confinement control. *Appl. Phys. B*, 106(4):857–862, 2012.
- [221] M. R. SHCHERBAKOV, B. B. TSEMA, Y. B. TSEMA, A. A. EZHOV, V. I. PANOV, D. P. TSAI et A. A. FEDYANIN : Near-field optical microscopy of plasmonic effects in anisotropic metamaterials. *Physica C*, 479:183–185, 2012.
- [222] B. HECHT, H. BIELEFELDT, Y. INOUE, D. W. POHL et L. NOVOTNY : Facts and artifacts in near-field optical microscopy. *J. Appl. Phys.*, 81((6)):2492–2498, 1997.