De nouvelles « super-lentilles » pour s'affranchir de la limite de la diffraction

Geoffroy LEROSEY
Institut Langevin, ESPCI ParisTech & CNRS
1 rue Jussieu, 75005 Paris
geoffroy.lerosey@espci.fr

Les ondes, quelle que soit leur nature, acoustique ou électromagnétique, sont soumises aux phénomènes de réfraction et de diffraction lorsqu'elles se propagent. La diffraction, en particulier, impose une contrainte fondamentale à tout système d'imagerie : deux objets ne peuvent être distingués que s'ils sont séparés d'une distance supérieure à la demi-longueur d'onde. Ce principe porte le nom de limite de la diffraction. Dans cet article nous rappellerons tout d'abord l'origine de cette limite, en introduisant notamment la notion d'onde évanescente. Puis nous discuterons la proposition de super-lentille faite par John Pendry en 2000, et nous montrerons en quoi elle se révèle inefficace dans la pratique. Nous détaillerons alors diverses nouvelles approches de super-lentilles, plus à même de vaincre la limite de la diffraction, en essayant d'en souligner les avantages et inconvénients.

Une limitation pour tous les systèmes ondulatoires

La limite de la diffraction impose de sévères limitations à tout système fonctionnant à l'aide d'ondes. Ainsi, deux antennes de même polarisation doivent être séparées d'une demi-longueur d'onde dans tout dispositif de télécommunications sans fils. Cette distance, qui est de l'ordre de 6 cm autour des fréquences WIFI, explique pourquoi les fournisseurs d'accès à internet développent des box basées sur la technologie multi-antennes relativement imposantes. De même, on retrouve la limite de la diffraction en échographie ultrasonore : c'est elle qui impose la résolution de l'ordre du millimètre des images qui peuvent être obtenues d'un

foetus in utero. Lorsque l'on cherche à imager à l'aide d'ultrasons la cornée de l'œil par exemple, qui présente des variations spatiales submillimétriques, il est ainsi nécessaire d'utiliser des ultrasons de plus hautes fréquences, afin d'abaisser en conséquence la longueur d'onde. Dans le domaine de la microscopie optique, qui est basée sur l'imagerie des variations de contraste optique ou d'absorption aux longueurs d'onde du spectre visible, cette solution est évidemment inenvisageable. Or c'est précisément en optique que les chercheurs rêvent d'avoir accès à l'infiniment petit : ceci pourrait par exemple permettre de visualiser les virus et leurs interactions avec le vivant en temps réel. Pour améliorer les résolutions des microscopes, il est donc nécessaire de s'affranchir

PLUS QU'UN CATALOGUE UN SAVOIR-FAIRE

- Plus de **26 500 PRODUITS EN STOCK**
- Possibilités de fabrication **SUR MESURE**
- **REMISES** sur grandes quantités
- **SUPPORT TECHNIQUE** en français

Venez nous
rencontrer au
SALON ENOVA,
8-10 OCTOBRE 2013
Numéro du stand **K13**
Parc des Expositions
Paris Porte de Versailles

Demande de
CATALOGUE
GRATUIT !

eo Edmund
optics | worldwide

www.edmundoptics.com
+33 (0) 820 207 555 | sales@edmundoptics.fr

de la limite de la diffraction, mais pour ce faire il faut auparavant en comprendre le mécanisme.

Limite de la diffraction et ondes évanescentes

Pour ce faire nous allons considérer l'exemple d'un système d'imagerie optique classique, et expliquer de façon relativement simple de quels phénomènes résulte sa limite de résolution. Supposons que l'on cherche à réaliser l'image d'un échantillon constitué d'une structure biologique telle qu'un virus, en l'éclairant par le bas à l'aide d'un laser dans le vert (*figure 1a*). Celui-ci réside dans le plan (xOy) de notre expérience de principe, quand la lumière, elle, traverse le dispositif selon l'axe (Oz). La lumière est collectée dans le champ lointain, c'est-à-dire à une distance grande devant la longueur d'onde sur l'axe (Oz), par exemple à l'aide d'un objectif et d'une caméra. Une partie de la lumière est transmise directement, et le reste est diffracté par les différences de propriétés optiques de l'échantillon, dont les dimensions spatiales moyennes δ sont de l'ordre du nanomètre. Le plan (xOy), sur lequel est situé le virus à observer, est ainsi le siège d'un champ électromagnétique complexe, et les ondes qui le constituent peuvent varier sur des dimensions caractéristiques qui sont nanométriques également. Si l'on était capable de venir observer ces ondes à quelques nanomètres du plan (xOy), on reconnaîtrait les moindres détails du virus et le résultat serait parfait (*figure 1b*). Mais dès que l'on s'éloigne de celui-ci, nous allons voir que les choses changent de façon drastique.

À présent nous allons passer dans le domaine de Fourier, c'est-à-dire parler de vecteurs d'onde plutôt que de longueurs d'onde. De façon équivalente à ce qui a été dit précédemment, les ondes présentes à la surface de l'échantillon possèdent des vecteurs d'onde dont la norme, dans le plan (xOy), peut être aussi large que $1/\delta$. Lorsque l'on cherche à observer depuis le champ lointain le virus en question, ce sont des ondes se propageant sur l'axe (Oz) que l'on mesure : on doit donc s'assurer, quel que soit l'objectif utilisé, qu'elles

Figure 1. Schéma d'une expérience d'imagerie classique d'un composé biologique. **a)** La source lumineuse éclaire l'échantillon par le bas et deux types d'ondes sont créés : des ondes propagatives correspondant aux détails de l'objet de taille supérieure à la demi-longueur d'onde et qui atteignent le champ lointain, et des ondes évanescentes, correspondant aux détails plus fins, qui décroissent de façon exponentielle depuis la surface de l'échantillon et restent donc cantonnées au champ proche. **b)** Image d'un virus vu depuis plusieurs distances selon l'axe de la propagation (simulation). En champ proche, c'est-à-dire à quelques nanomètres de la surface, on distingue tous les détails spatiaux et ceux-ci se brouillent lorsqu'on s'éloigne pour ne faire apparaître qu'une image très mal résolue en champ lointain.

présentent un vecteur d'onde réel et non nul k_z . Pour les ondes dont le vecteur d'onde projeté dans le plan (xOy) présente une norme inférieure au nombre d'onde des photons issus du laser ($k_0 = 2\pi/\lambda$), cela ne pose aucun problème et elles sont correctement capturées par le dispositif de mesure. En effet, si le milieu de propagation est l'air, les équations de Maxwell impliquent uniquement que la norme du vecteur d'onde tridimensionnel soit égale à k_0 . En utilisant un objectif à grande ouverture, on peut donc avoir accès à toutes ces ondes. La situation est toute différente pour les ondes qui possèdent un vecteur d'onde projeté dans le plan (xOy) dont la norme est supérieure à k_0 : pour celles-ci, les équations de Maxwell imposent un vecteur d'onde imaginaire selon l'axe (Oz). Ces ondes décroissent donc de façon exponentielle depuis l'échantillon et elles deviennent quasi-inexistantes à une longueur d'onde de celui-ci : on parle alors d'ondes évanescentes.

Ainsi une onde présente à la surface de l'échantillon, et dont le vecteur d'onde présente une norme inférieure à k_0 , c'est-à-dire qui varie sur des échelles inférieures à la demi-longueur d'onde, se propage vers le champ lointain et est dite propagative. A contrario les ondes évanescentes, qui portent des informations spatiales plus petites que la

demi-longueur d'onde, restent cantonnées au champ proche de l'échantillon (*figure 1a*). C'est l'origine de la limite de la diffraction : la propagation agit comme un filtre spatial passe-bas dont la fréquence de coupure est la demi-longueur d'onde, et toute observation faite depuis le champ lointain présente une résolution limitée (*figure 1b*). Afin d'avoir accès aux détails spatiaux de notre virus, nous devons alors être en mesure de venir sonder les ondes évanescentes présentes à sa surface, et pour ce faire il faut s'approcher à quelques nanomètres de celui-ci, dans un domaine appelé le champ proche. Une première solution qui s'offre à nous consiste à venir placer sur celui-ci une sonde nanométrique qui vient détecter localement, à la manière d'un stéthoscope, les ondes évanescentes ; c'est le domaine de l'optique de champ proche, qui offre des possibilités énormes mais présente un désavantage majeur : afin de réaliser l'image d'un objet étendu spatialement, il faut chariotter la sonde locale de façon mécanique, ce qui exclut de fait toute imagerie en temps réel. C'est pourquoi nombre de chercheurs sont à la poursuite du Graal de l'imagerie, à savoir une « super lentille » que l'on place dans le champ proche d'un objet, qui est capable d'en réaliser l'image sans limite de résolution et rapidement.

Amplifier le champ proche : la super lentille de John Pendry

La première proposition de super lentille remonte à l'année 2000, au cours de laquelle John Pendry, Professeur à l'Imperial College de Londres, publie l'article « Negative refraction makes a perfect lens » dans *Physical Review Letters* [1]. Il était connu depuis la fin des années 1960 et le travail du russe Viktor Veselago, que des ondes transmises d'un milieu à indice de réfraction positif vers un hypothétique milieu à indice de réfraction négatif subissent une réfraction dont l'angle est négatif. Mais il fallut attendre près de trente ans l'avènement du concept de métamatériaux (et par là même de métamatériaux à indice négatif) pour que les premières démonstrations de ce phénomène apparaissent. Réfléchissant sur ce concept, John Pendry fait alors deux remarques. La première, qui découle directement de la découverte de Veselago, est qu'une tranche de matériau à indice négatif constitue une lentille idéale pour les ondes propagatives car elle permet de compenser la phase accumulée par les ondes en dehors de la lentille, c'est-à-dire dans l'air, et ce pour tous les angles d'incidence. Ainsi, lorsque l'on place un objet à l'entrée de la lentille, une première image est créée dans la lentille, suivie d'une

deuxième image, à l'extérieur de la lentille (figure 2a). Rien de très extraordinaire dans cette observation, mais c'est la deuxième proposition de l'article qui justifie l'effervescence générée par celui-ci depuis 13 ans. Pendry calcule la fonction de transfert de cette tranche de matériau à indice négatif, cette fois pour des ondes évanescentes, et arrive à la conclusion suivante : les ondes évanescentes sont amplifiées par la lentille ainsi constituée (figure 2b). Ce phénomène découle du fait que la tranche de matériau à indice négatif crée une cavité de type Fabry-Pérot qui piège les ondes évanescentes, et accumule de l'énergie indéfiniment d'après les calculs de Pendry. Ainsi un champ optique contenant des ondes évanescentes et placé en regard de la lentille est amplifié à l'infini, rendant la lentille parfaite, c'est-à-dire sans limite de résolution. En effet, si l'on peut faire croître à souhait l'amplitude de ces ondes évanescentes, qui d'ordinaire meurent à quelques dizaines de nanomètres de l'échantillon, il devient alors possible de les observer depuis le champ lointain, malgré leur décroissance exponentielle.

Cette proposition a donné lieu à de multiples tentatives expérimentales. Elle aura ainsi eu le mérite de générer une incroyable excitation dans des domaines aussi variés que l'optique, l'électromagnétisme ou encore l'acoustique, et a

Figure 2. Super lentille idéale de John Pendry. *a)* Lorsqu'on image un objet à l'aide d'une lentille constituée d'une tranche de matériau d'indice $n = -1$ dans l'air, les ondes propagatives, ou rayons lumineux, sont réfractés avec un angle négatif, générant ainsi une première image de l'objet dans la lentille et une seconde à la sortie de celle-ci. *b)* Mieux encore, la super lentille étant une cavité de type Fabry-Pérot pour les ondes évanescentes, celles-ci sont amplifiées par effet résonant, et leur amplitude est démultipliée à la sortie de la lentille, laissant entrevoir la possibilité de les capturer en champ lointain.

Le Micro-usinage

ne doit pas être une tâche impossible

Platines de translation

- Modèles de course allant de 50mm à 1.5m
- Vitesse jusqu'à 2 m/s
- Conception à joints latéraux et capot acier
- Faible coût, haute performance
- Vis à billes ou à moteurs linéaires

Système intégré Axes servo / Scanner

- Grand choix de focales et ouvertures
- Précision ultime et stabilité thermique
- Synchro tirs laser en temps réel sur les positions scanner/axes servo

Système d'usinage cylindrique

- Plateforme de déplacement translation / rotation
- Architecture de contrôle avancée
- Configurations à simple ou double broche

Système gantry à moteurs linéaires

- Vitesse 3 m/s et accélération 5 g
- Précision exceptionnel et performance pour une productivité maximale
- Versions "étanches" et options customisées pour votre application

Notre brochure gratuite
Usinage LASER
et Micro-usinage

www.aerotech.com/about-us/brochures.aspx

Dedicated to the
Science of Motion

Ph: +06 58 08 91 56
Email: ventes@aerotech.com
www.aerotech.com

Aerotech Worldwide

United States • France • Germany • United Kingdom
China • Japan • Taiwan

AT1212DLM-FR

grandement participé à la création de la thématique très riche des métamatériaux. Cependant, comme de nombreuses propositions théoriques, celle de John Pendry reposait sur certaines hypothèses. En particulier, afin de réaliser un métamatériau à indice effectif négatif, il faut utiliser des cellules élémentaires résonantes, qui sont par nature très dissipatives, surtout dans le domaine de l'optique. Ceci limite grandement l'amplification des ondes évanescences et, dans la pratique, la résolution optimale de ce type de lentille n'a pas atteint moins d' $1/6^e$ de longueur d'onde. Mais ces pertes ont une conséquence beaucoup plus désastreuse. En effet, l'amplification des ondes évanescences restant très limitée, celles-ci sont bien transmises de l'autre côté de la lentille et leur amplitude optimisée, mais elles restent cantonnées à son champ proche et meurent à nouveau quelques dizaines de nanomètres plus loin, restant invisibles à tout composant optique. C'est pourquoi les recherches se sont par la suite orientées vers des super lentilles permettant de convertir le champ proche en champ lointain, observable à l'aide d'instruments classiques, c'est-à-dire vers des lentilles qui transforment les ondes évanescences en ondes propagatives.

Du champ proche vers le champ lointain : convertir les ondes évanescences en ondes propagatives

La super lentille de champ lointain

En 2006, Stéphane Durant, ancien étudiant de Jean-Jacques Greffet et alors post-doctorant dans le laboratoire de Xiang Zhang à l'université de Californie à Berkeley, réalise qu'une solution pour obtenir une lentille super résolue consiste à diffracter les ondes évanescences amplifiées par une super lentille afin de pouvoir les observer depuis le champ lointain. Une approche couramment utilisée pour convertir les ondes évanescences en ondes propagatives consiste à utiliser des réseaux de diffraction, et en particulier des réseaux de diffraction dont la période est inférieure à la demi-longueur d'onde.

Les spécialistes mondiaux de cet axe de recherche sont d'ailleurs en France, à l'Institut Fresnel à Marseille, notamment dans l'équipe d'Anne Sentenac. La diffraction d'une onde par un réseau de diffraction se résume simplement : une onde plane de vecteur d'onde k est diffractée par un réseau de diffraction en une infinité d'ondes planes, appelée ordres de diffraction, de vecteurs d'onde k_r , qui sont égaux au vecteur d'onde initial plus un nombre entier (positif ou négatif) de fois l'inverse du pas du réseau. Ainsi les réseaux de diffraction, s'ils sont surtout connus pour leur pouvoir séparateur des composantes spectrales de la lumière, peuvent également servir pour avoir accès aux ondes évanescences. En effet, comme nous l'avons rappelé précédemment, les ondes évanescences, qui portent l'information des détails les plus fins d'un objet à imager et s'éteignent au voisinage de sa surface, possèdent un vecteur d'onde dont la norme est trop élevée pour pouvoir se propager. Dès lors, il apparaît clairement qu'en approchant très près d'une telle onde un réseau de diffraction, celui-ci peut en diffracter une partie dans un ordre qui peut se propager ; pour ce faire il suffit que la norme du vecteur d'onde de l'ordre considéré soit comprise en 0 et k_0 .

C'est exactement l'approche adoptée par Stéphane Durant quand il a développé le concept de la super lentille de champ lointain [2]. L'idée consiste tout d'abord à utiliser une super lentille du type de celle proposée par John Pendry, afin d'amplifier les ondes évanescences présentes à la surface d'un objet que l'on cherche à imager. Bien sûr, comme nous l'avons dit, bien que ces ondes soient transmises à travers la lentille, elles n'atteignent jamais le champ lointain. C'est pourquoi on place au-dessus de la super lentille un réseau de diffraction dont la période est sensiblement plus petite que la longueur d'onde : le premier ordre ainsi diffracté présente un vecteur d'onde qui lui permet de se propager (figure 3a). Ainsi, en faisant l'acquisition des ondes diffractées par le réseau de diffraction, qui correspondent aux ondes évanescences, on a accès aux détails sub-longueur d'onde de l'objet. Bien sûr, il faut également imager les détails de l'objet qui sont au-dessus de la limite de

la diffraction et, pour ce faire, on mesure la composante de la lumière qui n'est pas diffractée par le réseau de diffraction. On possède alors l'information totale de l'objet, qui est mieux résolue d'un facteur 2 ou 3 par rapport à une image obtenue à l'aide d'un microscope basique (figure 3b).

Cette méthode a par la suite été relativement peu poursuivie en raison de deux limitations assez drastiques. D'une part, si l'on veut éviter que les ordres successifs de diffraction du réseau ne se recouvrent, et empêchent ainsi la reconstruction de l'image, il faut utiliser un réseau de diffraction sub-longueur d'onde ; de ce fait, seul un ordre peut participer au processus d'imagerie, et donc, on ne peut avoir accès qu'à certaines ondes évanescences, plus précisément, à un intervalle de largeur $2k_0$ centré sur l'inverse du pas du réseau, ce qui limite la résolution de la lentille. D'autre part l'exemple présenté concerne un objet unidimensionnel. La généralisation du concept à des objets bidimensionnels suppose de répéter l'opération décrite précédemment en opérant des rotations du réseau de diffraction et des acquisitions successives, ce qui à nouveau limite la cadence d'imagerie et n'est pas souhaitable. Nous allons à présent voir une super lentille de champ lointain qui permet une imagerie de champ lointain super résolue en 2 dimensions au prix d'un processus de nano-fabrication de plus en plus complexe.

Une hyper lentille pour magnifier les objets

C'est Evgenii Narimanov, alors à l'université de Princeton aux USA, qui propose initialement le concept de « hyperlens » qui découle directement du fonctionnement d'une lentille convergente classique. Le pouvoir de magnification d'une telle lentille repose en effet sur un principe simple : afin de grossir un objet, il suffit de transformer l'espace vu par les ondes lumineuses de manière à ce que deux rayons lumineux qui proviennent de points très proches dans l'espace s'écartent en se propageant. S'il existait dans le visible des matériaux transparents et présentant des contrastes optiques extrêmement élevés, il serait possible de réaliser des objectifs à immersion présentant des résolutions

Figure 3. Super lentille de champ lointain (FSL). **a)** Un objet présentant des détails spatiaux petits devant la longueur d'onde est placé dans le champ proche d'une FSL constituée d'une super lentille surmontée d'un réseau de diffraction sub-longueur d'onde. Les ondes évanescentes sont ainsi amplifiées par la super lentille et diffractées par le réseau de diffraction en ondes propagatives, avant d'être imagées à l'aide d'un objectif de microscope classique. **b)** Deux fentes séparées par une distance de 70 nm sont imagées avec et sans FSL à une longueur d'onde de 385 nm. L'image classique montre une seule ligne lumineuse, car le critère de Rayleigh n'est pas satisfait, mais la FSL permet de les imaginer correctement, démontrant ainsi une résolution d' $1/5^e$ de longueur d'onde.

bien meilleures que celles de nos microscopes et le concept de super lentille serait absurde. Malheureusement ces matériaux n'existent pas et il faut donc faire appel aux métamatériaux pour trouver une solution au problème. Les propriétés optiques des matériaux naturels restant très limitées, les métaux souffrent de lourdes pertes dissipatives et les diélectriques présentent des permittivités faibles : il reste impossible de réaliser des métamatériaux à indice effectif très élevés dans cette gamme spectrale. En revanche on peut créer

des métamatériaux anisotropes qui supportent des vecteurs d'ondes très élevés dans un plan mais relativement faibles perpendiculairement à celui-ci. Pour cela on peut faire appel au concept de métamatériaux hyperboliques, qui possèdent une permittivité anisotrope dont les composantes sont égales dans un plan et de signe opposé dans l'axe perpendiculaire à ce plan, et présentent une relation de dispersion en forme d'hyperbole. Il est relativement simple en théorie d'obtenir ce type de matériau composite en alternant

successivement des couches très fines, quelques nanomètres, de métal et de diélectrique à faible permittivité. Un tel métamatériau supporte donc des vecteurs d'onde très élevés dans les dimensions x et y – des ondes évanescentes peuvent s'y propager, et relativement modérés dans la direction perpendiculaire. Reste à trouver le processus de magnification ; pour ce faire, on ne réalise pas un métamatériau en déposant des couches parallèles et rectilignes de métal et de diélectrique, mais on choisit de les déposer de façon

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock

Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

Figure 4. Hyper lentille. **a)** Un objet sub-longueur d'onde est placé dans le champ proche d'une hyper lentille constituée d'un assemblage concentrique de films fins de métal et de diélectrique. Les propriétés hyperboliques du métamatériau lui permettent de supporter des modes à très grands vecteurs d'ondes tangentiels qui, lors de la propagation, sont contractés jusqu'à être de norme inférieure au nombre d'onde du vide. Ceci permet aux ondes évanescentes d'être converties en ondes propagatives, qui peuvent alors être observées à l'aide d'une lentille ordinaire. **b)** Image super résolue obtenue à l'aide de l'hyper lentille d'un profil présentant des détails plus petits que la demi-longueur d'onde.

courbe et concentrique (figure 4a). Ainsi, lorsqu'une onde évanescente, qui présente donc un large vecteur d'onde, se propage de couche en couche de façon radiale, la continuité du vecteur d'onde tangentiel imposée par les relations de continuité résulte en une diminution continue de sa norme. Il suffit d'adapter le nombre de couches pour que le vecteur d'onde tangentiel soit de norme inférieure à k_0 à la sortie de la lentille et l'onde, initialement évanescente, peut se propager en champ lointain et être imagée à l'aide d'un appareillage optique classique. On obtient alors une hyper lentille unidimensionnelle.

C'est ce qu'a réalisé expérimentalement l'équipe du Professeur Xiang Zhang, menée par le Professeur Zhaowei Liu alors post-doctorant [2]. Il va de soi que la nano-fabrication d'une telle hyper lentille pose un certain nombre de défis technologiques au rang desquels le contrôle de la qualité de surface des films déposés figure en bonne place. Néanmoins cette équipe a pu vérifier que le principe de l'hyper lentille fonctionne, et obtenir des images de

profils quasi unidimensionnels avec une résolution à peu près deux fois meilleure que la limite de la diffraction, c'est-à-dire avec une magnification d'un facteur 2 (figure 4b). Une autre équipe a démontré des résultats similaires mais cette fois pour des objets bidimensionnels, à l'aide d'une hyper lentille constituée de calottes sphériques de métal et de diélectrique présentant des épaisseurs nanométriques, soit l'équivalent 2D de la lentille détaillée ici. Cependant, les limites d'une telle super lentille apparaissent relativement clairement. En effet le processus de magnification dépend directement de la taille de l'échantillon investigué à cause de la forme courbe de la lentille : plus l'objet à observer est étendu, plus celle-ci doit présenter de couches de métal et de diélectrique pour obtenir une magnification souhaitée. C'est donc à nouveau les pertes engendrées par le métal qui limitent les performances de cette hyper lentille en pratique à des magnifications de l'ordre de 2 ou 3 pour des champs de visions micrométriques. Nous allons voir pour finir que les pauvres

propriétés optiques des métaux dans le visible limitent en fait toutes les tentatives de super lentilles proposées à ce jour.

Une super lentille de champ lointain qui utilise la variable « temps »

Jusqu'à présent nous n'avons présenté que des super lentilles basées sur des approches monochromatiques. Or l'Institut Langevin et son créateur Mathias Fink se sont attachés à montrer depuis une vingtaine d'années que la variable temporelle peut avoir une grande importance, notamment dans le contexte du retournement temporel. C'est dans ce cadre que nous avons proposé une méthode pour battre la limite de la diffraction depuis le champ lointain dans le domaine des micro-ondes en 2007. Ces travaux ont par la suite été poursuivis dans le cadre de la thèse de Fabrice Lemoult lors de laquelle nous les avons généralisés et appliqués à divers types d'ondes. Nous avons pu montrer qu'une façon élégante de briser la limite de la diffraction consiste à utiliser des éléments résonants dont la taille est très petite devant la longueur d'onde à leur fréquence de résonance. Lorsqu'on assemble ces petits résonateurs en une matrice de période très petite devant la longueur d'onde, on crée un métamatériau qui possède un indice effectif très élevé. En d'autres termes, les éléments résonants se couplent entre eux et donnent naissance à des modes collectifs qui peuvent osciller spatialement à l'échelle de la distance entre résonateurs. Ces modes sont donc par nature évanescents et, si le milieu est infini, ils ne peuvent par conséquent pas se coupler aux ondes propagatives. Nos travaux ont montré que cette assertion est vraie, mais qu'il est possible de la contourner en utilisant non pas une infinité de résonateurs mais un ensemble fini. Ceci a deux conséquences d'égale importance. Tout d'abord, lorsqu'on utilise ainsi un ensemble fini d'éléments résonants, on crée un milieu qui supporte un nombre fini de modes résonants, et chaque mode possède sa propre fréquence de résonance. Ainsi, si l'on utilise non pas des ondes monochromatiques mais des ondes à large spectre, une impulsion par exemple, on peut exciter tous ces modes simultanément. De façon très simplifiée chaque

Figure 5. Méta-lentille résonante. **a)** La lentille est constituée d'un assemblage de nano-fils d'argent résonants parallèles les uns aux autres et séparés de 50 nm. Cette lentille supporte un nombre fini de modes propres résonants qui possèdent chacun leurs propres longueurs d'onde de résonance. Lorsqu'on éclaire une telle lentille avec de la lumière pulsée à large spectre, ici des impulsions de 5 ns, on accède à tous ces modes propres, ce qui décuple les possibilités d'imagerie sub-longueur d'onde. **b)** Simulation d'une expérience d'imagerie de champ lointain autour de 800 nm. On distingue clairement deux barreaux de diélectrique d'indice faible séparés par une distance petite devant la longueur d'onde, démontrant ainsi une résolution de 80 nm depuis le champ lointain, soit $1/10^e$ de longueur d'onde.

fréquence utilisée, parce qu'elle adresse un unique mode propre du système, permet d'obtenir de l'information dans le but d'imager un échantillon ou de focaliser de l'énergie : ceci décuple les possibilités de l'approche en comparaison du cas monochromatique. La deuxième conséquence de l'usage d'un ensemble fini de résonateurs concerne les ondes évanescentes supportées par le milieu : celles-ci peuvent maintenant être diffractées en ondes propagatives vers le champ lointain par les bords du milieu, et donc y être mesurées. La conversion d'ondes évanescentes en ondes propagatives par effets de taille finie présente généralement une efficacité relativement faible. Mais ici, comme le milieu est composé de résonateurs et que les modes collectifs sont résonants, à l'instar de la super lentille de John Pendry, le milieu accumule de l'énergie dans le temps ce qui contrebalance l'inefficacité des effets de diffractions. En conséquence,

lorsque l'on place un objet dans le champ proche d'un tel ensemble de résonateurs et qu'on l'éclaire avec des ondes à large spectre, l'information spatiale de ce dernier se retrouve codée dans la signature temporelle du champ généré dans le milieu. Ce champ est alors converti de façon très efficace en ondes propagatives que l'on peut observer depuis le champ lointain et décoder afin de reconstruire l'objet. On a donc réalisé une super lentille de champ lointain que nous avons nommée méta-lentille résonante, car elle est constituée d'un métamatériau résonant.

Après avoir prouvé le concept à l'aide de micro-ondes et d'ondes acoustiques, nous avons démontré numériquement qu'une telle lentille peut être réalisée dans le domaine de l'optique visible. Pour ce faire nous avons choisi de travailler avec des petits résonateurs plasmoniques, c'est-à-dire des nano-fils d'argent placés sur un substrat parallèlement les uns aux autres,

ANALYSEUR DE SPECTRE OPTIQUE

NOUVEAU
OSA20

Caractéristiques clés

- Plage : 1250 - 1700 nm
- Résolution : 20 pm
- Vitesse max : 2000 nm/s
- Courbe de 225.000 points
- Référence λ : Acétylène
- Ecran tactile multipoint
- Interfaces externes :
 - USB2 et USB3
 - Ethernet
 - Trigger IN & OUT
 - GPIB
- Modes d'utilisation par application et librairie de fonctions d'analyse

Yenista
OPTICS

Tél. : +33 (0)2 96 48 37 16
sales-emea@yenista.com
www.yenista.com

espacés d'une distance petite devant la longueur d'onde (*figure 5a*). Nous avons ainsi pu vérifier qu'une telle lentille supporte des modes collectifs qui varient spatialement à des échelles très sub-longueur d'onde (le métamatériau créé est en fait anisotrope et hyperbolique). Puis nous avons ensuite utilisé ces modes pour battre la limite de la diffraction depuis le champ lointain, en focalisant de la lumière sur des taches focales larges d'un $1/25^\circ$ de longueur d'onde à peine, et en réalisant des images 5 fois mieux résolues que celles que l'on pourrait obtenir à l'aide d'un microscope classique (*figure 5b*). Bien sûr, notre approche présente ses limites comme toutes les autres. En premier lieu, nous n'avons pu que simuler cette super lentille par manque de moyens expérimentaux, et la démonstration réelle du concept, si elle est parfaitement réalisable, reste un challenge expérimental. Concernant les limitations de l'approche, le métal utilisé dans la super lentille impose également des contraintes sur le

champ de vision et la résolution, même si ces limites sont moins drastiques que pour l'hyper lentille par exemple. L'utilisation d'éléments résonants différents, pourquoi pas un jour des molécules, pourrait peut-être permettre de remédier à ces problèmes et obtenir des résolutions bien meilleures.

Un domaine de recherche extrêmement riche

Dans cet article, nous avons souhaité montrer quelles sont les limites de l'imagerie classique en termes de résolution. Nous avons expliqué que les performances médiocres des microscopes optiques pour mesurer l'infiniment petit découlent du fait que ce dernier est porté par les ondes évanescentes, qui sont cantonnées au champ proche de l'objet à imager. Nous avons alors discuté plusieurs solutions qui ont été proposées récemment pour venir mesurer en temps réel à l'aide d'une

super lentille ce champ proche, et avons tenté d'en dégager les principaux avantages et inconvénients. Si nous n'avons pas pu proposer de solution miracle permettant d'atteindre des résolutions bien plus petites que la longueur d'onde sur des champs de vision très larges, nous espérons néanmoins avoir prouvé au lecteur que ce domaine de recherche est extrêmement riche et que nombre d'idées peuvent encore être découvertes pour battre la limite de la diffraction.

Références

- [1] J.B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Physical Review Letters* **85**, 3966 (2000).
- [2] X. Zhang and Z. Liu, "Superlenses to overcome the diffraction limit", *Nature Materials* **7**, 435-441 (2008).
- [3] F. Lemoult, M. Fink and G. Lerosey, "A polychromatic approach to far-field superlensing at visible wavelengths", *Nature Communications* **3**, 889 (2012).

Capteur d'image 2D, 128x128 pixels pour l'imagerie proche IR

Spécifications G11097-07075

- Réponse spectrale: 0,95 à 1,7 μm
- Excellente linéarité par compensation d'offset
- Haute sensibilité: 1600 nV/e-
- Mode Global Shutter
- Générateur d'horloge intégré
- Refroidissement par étage Peltier

Applications

- Imagerie thermique
- Profil de faisceau laser
- Détection de particule étrangère
- Tri pour agro-alimentaire (teneur en sucre,...)

enova
PARIS

Stand K9

8-9-10
OCT 2013

Hall 7.2 - Paris expo
Porte de Versailles

HAMAMATSU

PHOTON IS OUR BUSINESS

www.hamamatsu.fr - infos@hamamatsu.fr