

# Hologrammes synthétisés par ordinateur

Depuis la découverte du laser et des premiers calculateurs vers les applications les plus récentes

Lionel Jacobowicz  
[lionel.jacobowicz@institutoptique.fr](mailto:lionel.jacobowicz@institutoptique.fr)

Les optiques diffractives présentent de nombreux avantages par rapport aux optiques traditionnelles. Elles sont en général légères, peu encombrantes, possèdent des propriétés qui n'existent pas en optique traditionnelle et interviennent dans la fabrication d'éléments hybrides (modification de la polarisation, compensation de la dispersion...). Elles sont potentiellement très peu onéreuses car elles peuvent être répliquées en très grand nombre et fabriquées par des méthodes semblables à celles utilisées pour les composants semi-conducteurs. Il n'est donc pas surprenant que ces nouveaux éléments optiques se répandent à l'heure actuelle dans un très grand nombre d'applications industrielles.

Le développement rapide des techniques de photolithographie ou, plus généralement, de micro fabrication permet aujourd'hui d'obtenir des masques de phase de plus en plus précis et complexes. Ces masques de phase (en anglais DOE : *diffractive optical element*) placés devant un faisceau lumineux modifient spatialement le front d'onde pour obtenir la répartition d'éclairement souhaitée à une certaine distance.

Il existe des centaines d'applications industrielles de ces composants diffractifs dans des domaines très variés : télécommunications optiques, lasers, sécurité contre les contrefaçons, micro-display, conception optique, vision industrielle, lithographie, biotechnologie, gadgets...

Voici l'exemple d'une diode laser rouge munie de modules DOE interchangeables (le cylindre rouge, *figure 1*) qui permettent d'obtenir une grille de points, des cercles concentriques, une ligne, etc... Ces outils sont très utiles pour effectuer des mesures tridimensionnelles ou pour la vision industrielle.

De la même façon, les modulateurs spatiaux de lumière (SLM : *spatial light modulator*) et les microsystèmes électromécaniques (MEMS : *microelectromechanical systems*), les micro-miroirs, ou les miroirs déformables sont de plus en plus diversifiés et performants. Tous ces composants autorisent le contrôle local de la phase du front d'onde et permettent d'agir sur les faisceaux lumineux

www.photonix.com



Figure 1. Exemples de figures obtenues avec des éléments diffractifs.



ILLUMINEZ LE MONDE



## Diodes Lasers Pulsées

### Gamme de Produits

PLDs à 850 nm  
10,5 W

PLDs à 905 nm  
Mono-émetteur  
Empilement

Versions multi-jonctions  
jusqu'à 650 W

PLDs à 1550 nm  
Versions sécurité oculaire  
jusqu'à 45 W

### Versions Spéciales

PLDs fibrées

Modules à diode laser pulsée

### Versions Spécifiques Clients

[www.lasercomponents.fr](http://www.lasercomponents.fr)

en temps réel. Ils sont utilisés dans un nombre grandissant d'applications d'optique de pointe.

Avant de montrer quelques applications spectaculaires et récentes de ces éléments dans le domaine de la recherche, nous allons rappeler comment sont calculés ces masques de phase.

## Holographie numérique, la préhistoire

Mais auparavant, retournons quelque 35 ans en arrière aux bases des hologrammes dans le couloir jaune des *travaux pratiques* de SupOptique (bâtiment 503 de l'université d'Orsay). S'il fallait choisir un sujet parmi les très nombreux travaux pratiques de la formation d'ingénieur qui a marqué profondément les esprits de générations de jeunes SupOpticiens depuis les années 80, ce serait sans doute celui appelé « Hologramme synthétisé par ordinateur ». Lorsque, en 1992, j'ai été nommé à l'Institut d'optique comme enseignant au service des travaux pratiques, à chacune des séances cette expérience fascinait les élèves-ingénieurs. À l'époque ce HSO, comme on le nommait entre nous, était calculé par le gros, l'immense, l'incroyable calculateur, le HP 1000 ! Si je me souviens bien, les étudiants entraient un tableau binaire de 512 par 512 éléments, autrement dit une image en noir et blanc de 512 par 512 pixels, que le bon HP 1000 était capable de mettre en mémoire et même, chose incroyable à l'époque, d'en calculer la FFT 2D (on devrait dire en Français, TFR 2D : transformée de Fourier rapide à 2 dimensions). Puis le calculateur représentait ce tableau de 512 par 512 nombres complexes, obtenu par le calcul de cette FFT 2D, grâce à un « codage de Lohmann » (nous reviendrons plus loin sur ce fameux codage). Enfin cet hologramme de Lohmann était imprimé dans la salle informatique du rez-de-chaussée du bâtiment 503. Imprimé ? En réalité « l'imprimante » était sans doute un *plotter* HP. « Une machine qui faisait autant de bruit qu'un marteau piqueur », se souvient Jean-Paul Hugonin qui encadrait le même genre de TP pour le DEA. « On gravait les hologrammes au burin : c'était

*l'imprimante de l'âge de pierre* », renchérit Thierry Avignon qui se chargeait, avant chaque séance, de vérifier que les feutres noirs du *plotter* n'étaient pas secs ! Jean Taboury, directeur des études et responsable avec Pierre Chavel du cours d'optique physique dans ces années, m'a envoyé une photo d'un exemplaire d'hologramme synthétique de cette époque héroïque (figure 2).

Pour les étudiants, après avoir imprimé cette feuille présentant des petits carrés noirs apparemment jetés au hasard sur la page blanche, le travail consistait alors à photo-réduire cet hologramme, c'est-à-dire, scotcher cette feuille A4 au mur, bien l'éclairer avec de vieux projecteurs photo, réaliser une mise au point manuelle très précise, prendre une dizaine de clichés de cette page en jouant sur l'ouverture du diaphragme et le temps de pause afin d'obtenir un négatif argentique de format 24x36 mm le plus contrasté possible. Pour avoir une résolution suffisante, un boîtier Canon muni d'un excellent objectif de focale fixe 50 mm était dédié à cette tâche.

Puis venait le moment le plus émouvant et le plus angoissant pour les étudiants : s'enfermer dans le sombre labo photo afin de développer la pellicule, sortir le film argentique noir et blanc 50 ASA (à grains

très fins, toujours pour avoir la meilleure résolution) dans l'obscurité qui avait été préalablement préparée soigneusement par Marie-Thé Plantegenest ou Thierry Avignon, réussir à l'enrouler sur la bobine-support, le faire passer dans les différents bains, avant de pouvoir positiver sur le négatif. Cependant cette opération échouait parfois ! Et il fallait recommencer à zéro. Cette étape a sans doute traumatisé de nombreux étudiants. Cela doit d'ailleurs être le cas de Riad Haidar, rédacteur en chef de la revue *Photoniques*, mais aussi ancien élève de SupOptique qui, en 1999, a sans doute lui aussi été faire un tour dans ce labo photo si pittoresque. C'est sans doute la raison pour laquelle il me demande aujourd'hui, des années plus tard, d'écrire cet article...

Mais revenons à la fabrication du HSO maison. Une fois la pellicule révélée, un moment de détente, « la pause » pour les étudiants, laissait le temps à la vieille armoire grise, sécheuse à air chaud, de sécher le film. Puis, il était préférable de découper consciencieusement le film par photos et d'entourer de scotch noir et épais l'hologramme réduit sur la diapositive obtenue pour masquer les rayons qui, sinon, passeraient autour de l'hologramme.

Enfin venait la récompense : le HSO, plus exactement le négatif photo-réduit de l'hologramme (figure 2), était placé dans un faisceau laser He-Ne convergent, et dans le plan de convergence, c'est-à-dire le plan image du waist du laser, on obtenait par exemple l'image ci-contre (figure 3).

D'ailleurs, chaque année, à la fin de son cours à Polytechnique sur Joseph Fourier, Philippe Grangier, mon ami depuis l'époque où nous étions élèves ensemble à l'ENS Cachan, montre cette

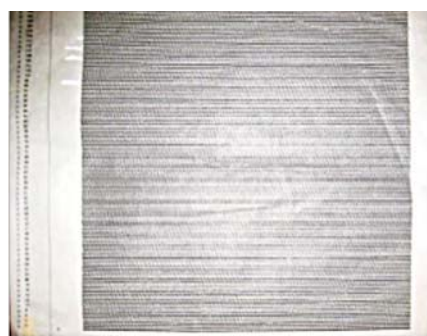


Figure 2. Un hologramme de Lohmann imprimé sans doute vers 1985 à l'Institut d'optique.

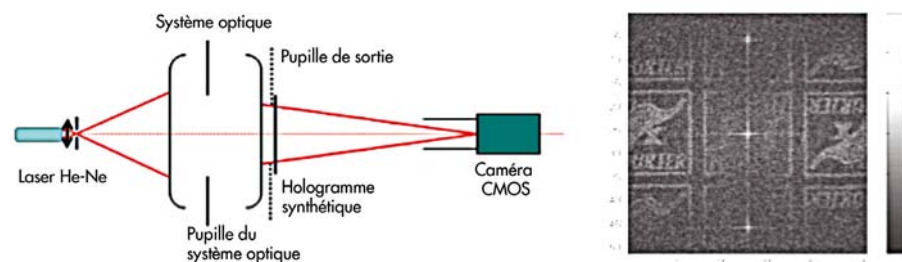


Figure 3. Banc de restitution de l'hologramme de Lohmann et image du bicorne obtenue sur la caméra.

expérience. Chaque année au mois de juin, le célèbre banc expérimental est transporté en voiture depuis le bâtiment de l'Institut d'optique jusqu'au grand amphithéâtre de Polytechnique par Thierry Avignon et Cédric Lejeune pour illustrer son cours devant les polytechniciens de première année sur la transformée de Fourier. Et, lorsque Philippe fait apparaître sur le grand écran panoramique de l'amphithéâtre Henri Poincaré le résultat de la transformée de Fourier optique de l'hologramme du bicorné du polytechnicien (figure 3), une salve d'applaudissements nourris salue d'un même élan l'expérience, le cours de Philippe, le génie de Joseph Fourier... et, je suppose, le fameux bicorné ?

### L'optique de Fourier

Car c'est bien de transformée de Fourier qu'il s'agit. En effet, lorsque l'on s'intéresse

à l'éclairage dans le plan image d'un point source (éclairage cohérent), il s'agit bien d'un cas de diffraction à l'infini (ou diffraction de Fraunhofer pour une conjugaison quelconque, l'important étant qu'on observe au point conjugué du point source). L'amplitude de l'onde dans le plan image (le plan de la caméra) peut donc être calculée simplement à partir de l'amplitude de l'onde dans la pupille par une simple transformée de Fourier à deux dimensions (TF 2D). Pour obtenir une image de l'objet de vos rêves sur la caméra, il suffit, inversement, de calculer la transformée de Fourier de cette image et de moduler l'onde dans le plan de la pupille par une transmittance proportionnelle à cette TF 2D.

Il suffit ? Le problème est justement là ! Cette transmittance est complexe. Il faut donc, *a priori*, un modulateur spatial d'amplitude et un modulateur spatial de phase pour donner à l'onde dans le plan de la pupille la bonne répartition de phase et

d'amplitude (qui donnera dans le plan image, l'image de l'objet de vos rêves).

On pourrait penser, *a priori*, qu'un négatif noir et blanc ne permet pas de moduler la phase. Pourtant, le bicorné apparaît bien sur le grand écran. L'HSO module donc bien la phase de l'onde. Quelle est l'astuce ? Comment contourne-t-on l'absence d'un modulateur de phase ?

### Le secret de l'Hologramme de Lohmann

L'holographie, l'invention géniale de Denis Gabor en 1947, destinée dans son esprit à améliorer la résolution d'un microscope électronique, donne une clé possible. Pour conserver la phase d'une onde optique, l'onde objet, il faut faire interférer cette onde objet avec une onde de référence. Une fois le réseau de franges d'interférence imprimé sur l'hologramme, on pourra restituer l'onde objet simplement

Les marques de la plateforme IDEX Optics & Photonics ont soigneusement sélectionné pour vous des lasers et des composants optiques performants, fiables et de qualité. Notre site IDEX Optics & Photonics Marketplace propose des optiques laser dans des versions standards et semi-custom.

Trouvez facilement ce que vous cherchez à :  
[marketplace.idexop.com](http://marketplace.idexop.com)  
 01 30 12 06 80



in Suivez-nous sur LinkedIn et @IOPMarketplace sur Twitter

ADVANCED THIN FILMS

CVI Laser Optics

MELLES GRIOT

Semrock

en éclairant l'hologramme par l'onde de référence.

La première phrase du discours de Denis Gabor, 24 ans plus tard, lors de sa remise du prix Nobel en 1971 pour l'invention de l'holographie est la suivante [1] :

*"I have the advantage in this lecture, over many of my predecessors, that I need not write down a single equation or show an abstract graph. One can of course introduce almost any amount of mathematics into holography, but the essentials can be explained and understood from physical argument."*

Suivant cet exemple, est-il possible d'expliquer sans aucune ligne de calcul, le secret de l'hologramme de Lohmann, exposé dans son article paru en 1967 [2], dont le titre est *"Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer"*? Le secret est une méthode appelée « détour de phase » exposée un an plus tôt [3]. Lohmann écrivait : *"There are three possibilities to influence the phase of a light wave: retardation while traveling through a dielectric, phase jump at reflection, and detour phase."*

Remarquons d'abord que, même si l'hologramme synthétisé par ordinateur restitue une image plane (et non une image en 3D), c'est bien un hologramme dans le sens où il permet de coder la phase d'une onde.

Voici un hologramme-type que nous cherchons à obtenir (figure 4). Vous aurez remarqué que j'ai choisi l'exemple d'un chat – pas nécessairement quantique, comme le chat de Schrödinger, simultanément dans l'état mort et l'état vivant, même si son hologramme fait inévitablement penser à un système de cryptographie. Il s'agit, plus précisément, du Chat du Cheshire, qui a la faculté d'apparaître et de disparaître selon sa volonté, suscitant l'amusement d'Alice aux pays des merveilles.

Chaque petit rectangle blanc est le codage d'un pixel de la TF 2D du chat (128x128 pixels) (figure 4) selon la règle suivante :

- la surface du petit rectangle blanc est proportionnelle à l'amplitude du nombre complexe correspondant ;
- la position du petit rectangle blanc est décalée horizontalement par rapport au centre du pixel, proportionnellement

à la phase du nombre complexe correspondant.

Le codage de l'amplitude est très simple à comprendre. L'amplitude de l'onde transmise par chaque rectangle blanc est proportionnelle à la racine carrée de l'aire du petit rectangle transparent sur le film argentique. Le codage de la phase est plus subtil. Supposons que la phase soit nulle pour tous les pixels. Tous les rectangles sont alors alignés verticalement. La transformée de Fourier du HSO ne donnera qu'un point au centre



Figure 4. Le Chat du Cheshire (128x128 pixels) et une petite partie de son HSO.

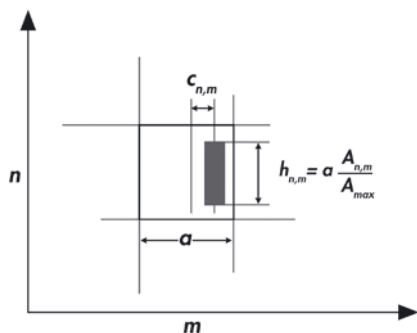


Figure 5. Le détour de phase illustré sur un pixel carré de côté  $a$ , à la position  $(n,m)$ . La hauteur  $h_{n,m}$  du rectangle est proportionnelle à l'amplitude de ce pixel de la FFT  $A_{n,m}$ . Le décalage du rectangle  $c_{n,m}$  est proportionnel à sa phase.

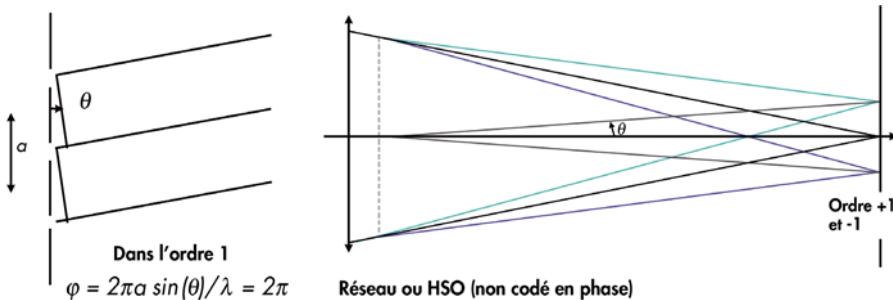


Figure 6. Cas d'un HSO dont on aurait omis de coder la phase (les rectangles blancs sont équidistants). On obtient les ordres de diffraction d'une mire de Foucault.

de l'image (ordre 0) et des points alignés horizontalement (les ordres de diffraction dont l'ordre +1 et l'ordre -1). Si l'on obtient un point lumineux dans la direction  $\theta$  de l'ordre +1, c'est qu'il s'agit d'une interférence constructive : la phase des ondes provenant de 2 carrés blancs successifs est donc égale à  $2\pi$  (figure 6).

Si au contraire les rectangles sont décalés horizontalement par rapport au centre du pixel, la phase des ondes provenant de 2 carrés blancs successifs est bien proportionnelle à la distance entre les 2 carrés (figure 7), et on obtient l'image du chat centrée sur la direction de l'ordre +1 (dans l'ordre -1, on obtient le symétrique du chat : normal puisque l'on a codé une phase de signe opposé ! La TF du conjugué d'un objet donne une image symétrique qui apparaît clairement sur les bicornes de la figure 3).

En réalité, il y a d'autres astuces pour obtenir ce chat. Une possibilité, par exemple, est de faire la TF à partir d'une image symétrique par rapport à son centre (figure 8). La TF est alors réelle et la phase nulle : plus besoin de déplacer les rectangles blancs.

Enfin, nous avons passé sous silence une recette à utiliser dans tous les cas, il faut ajouter une phase aléatoire sur l'objet binaire avant de calculer sa TF pour uniformiser l'amplitude dans le plan de Fourier (figure 9). Cette phase aléatoire n'aura aucune incidence sur l'image restituée, puisque l'œil ou la caméra, ou tout autre détecteur optique, n'est pas sensible à la phase de l'onde, mais à son module au carré. C'est encore une recette dont l'idée provient des hologrammes au sens habituel qui ne marche pas pour des objets

peu diffusants. Il faut étaler l'onde qui provient de l'objet sur une zone large de l'hologramme, donc on rajoute un verre faiblement dépoli sur le trajet optique, juste devant l'objet.

### L'holographie numérique en 2014

Même si le Service des Travaux Pratiques se nomme maintenant le LEnsE (Laboratoire d'Enseignement Expérimental) et qu'il est dirigé par ma collègue arrivée à l'IOGS en 1996, Fabienne Bernard, même si le sujet du TP a changé de nom : HSO est devenu « Synthèse et réalisation d'éléments diffractifs simples », cette séance de TP existe toujours pour les étudiants de 3<sup>e</sup> année qui sont étonnés à leur tour de voir les chats apparaître sur les murs. Réaliser un HSO est devenu très rapide : une imprimante laser transfère sur un transparent les hologrammes calculés par un petit programme Matlab sur un PC standard. Des hologrammes de corrections des aberrations sont aussi étudiés car des HSO ou des composants diffractifs sont toujours utilisés pour mesurer des surfaces asphériques ou corriger des aberrations. Mais on comprend aisément qu'un HSO réalisant une modulation spatiale de l'amplitude de l'onde transmise est très inefficace car l'éclairage dans

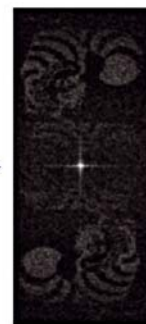
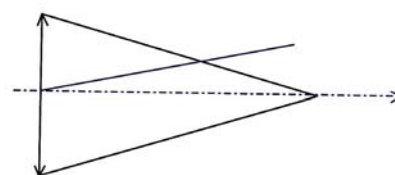
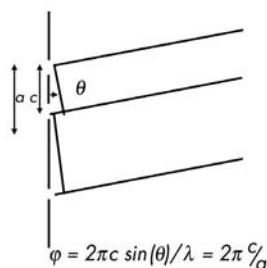


Figure 7. Cas d'un HSO codé en phase (les rectangles blancs sont déplacés proportionnellement à la phase) et résultat de la TF optique.



TF optique

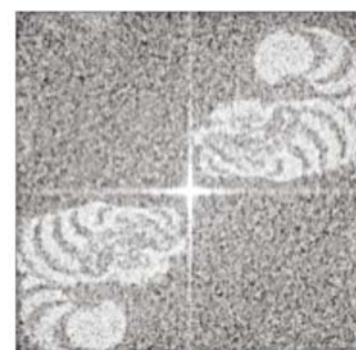


Figure 8. Hologramme binaire des chats symétriques et restitution obtenue par TF optique.

le plan image est inévitablement maximum dans l'axe (l'ordre 0 de diffraction) et les ordres +1 ou -1 sont beaucoup moins lumineux.

Comme indiqué dans l'introduction de cet article, l'évolution des technologies permet maintenant de fabriquer à

grande échelle des masques de phase de grande précision (*i.e.* des DOE, *diffraction optical elements*). On peut constater sur les images de la figure 1 qu'avec ces DOE il est possible d'obtenir un ordre zéro quasiment nul. Et la bonne nouvelle est que la modulation d'amplitude n'est pas

## 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](http://www.spectrogon.com)

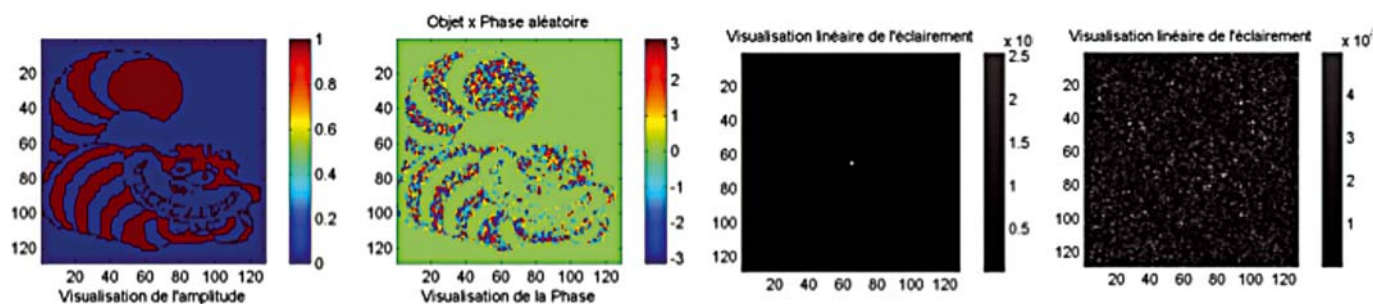


Figure 9. Chat seul, et chat multiplié par une phase aléatoire (à gauche) ; FFT du chat sans phase aléatoire, et avec phase aléatoire (à droite).

nécessaire. Une modulation de la seule phase permet d'obtenir n'importe quelle répartition binaire d'éclairage. Le calcul de cette phase peut être obtenu par une méthode itérative de calculs de FFT 2D (l'algorithme Gerchberg-Saxton [5]) très simple à programmer dans Matlab. De plus, il existe des modulateurs de phase configurables en temps réel à la cadence vidéo. Ce sont les SLM (*spatial light modulator*) obtenus à partir des écrans à cristaux liquides. Ces SLM sont utilisés depuis le début des années 2000 dans les téléphones portables ou les vidéoprojecteurs pour moduler l'intensité. En utilisant une autre configuration des polariseurs d'entrée et de sortie, ces mêmes composants deviennent des modulateurs de phase. Leur avantage par rapport aux DOEs est qu'ils permettent de modifier l'hologramme calculé par ordinateur, par exemple pour afficher soit la vitesse du véhicule sur un tableau de bord, soit, 50 ms plus tard, le portrait de Joseph Fourier (figure 10).

Le LEnsE s'est équipé<sup>1</sup> d'un SLM Holoeye qui a permis à Ivan Fernandez de Jauregui Ruiz, étudiant du Master Erasmus Mundus de monter, dans le cadre de son stage, une très belle expérience de sélection de modes spatiaux injectés dans une fibre faiblement multimode.

Ce même type de SLM est aussi couramment utilisé en microscopie (par exemple très récemment pour les méthodes d'illumination structurée qui permettent un gain de 2 en résolution par rapport à la limite de diffraction) ou pour les pinces



Figure 10. Un SLM Holoeye et le portrait de Joseph Fourier par Julien Léopold Boilly.

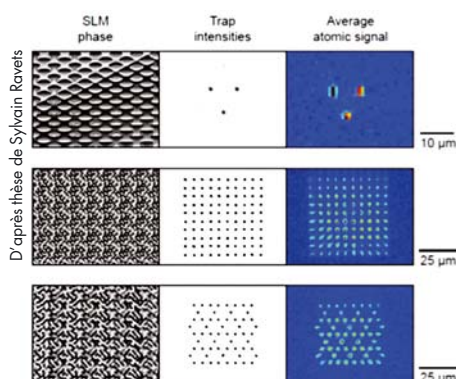


Figure 11. Exemples de matrice de pièges (à gauche : hologramme, au centre : images CCD des pièges obtenus, à droite : moyenne de 1000 images de fluorescence des atomes uniques chargés dans les pièges).

optiques capables de piéger et manipuler des particules ou des cellules (*Photoniques* 66, juillet-août 2013, « La pince optique » de Jean-Pierre Galaup).

Il est aussi possible d'utiliser les SLM pour piéger des atomes. Au sein du groupe d'Optique Quantique du Laboratoire Charles Fabry, Sylvain Ravets, dans le cadre de sa thèse dirigée par Antoine Browaeys [6], reprenant des travaux effectués en 2004 avec la participation du LEnsE [5], a réussi l'exploit d'obtenir des matrices de pièges à atome unique selon des géométries variées et complexes (figure 11).

En conclusion de cet article que j'ai finalement écrit avec plaisir, je reprendrai simplement la phrase que les élèves de SupOptique découvrent sur l'écran de l'ordinateur du LEnsE à chaque fois qu'ils quittent une de « mes applications » Matlab : « C'est beau l'optique de Fourier ! Au revoir et merci. »

## Références

- [1] "Holography", Nobel Lecture, December 11, 1971 by Dennis Gabor, Imperial Colleges of Science and Technology, London.
- [2] "Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer", A.W. Lohmann and D.P. Paris, *Applied Optics* 6(10), 1739 (1967)
- [3] "Complex Spatial Filtering with Binary Masks", B.R. Brown and A.W. Lohmann, *Applied Optics* 5(6), 96 (1966)
- [4] "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures", R.W. Gerchberg and W.O. Saxton, *Optik* 35, 237 (1972)
- [5] "Holographic generation of microtrap arrays for single atoms by use of a programmable phase modulator", S. Bergamini, B. Darquié, M. Jones, L. Jacobowicz, A. Browaeys, and P. Grangier, *Journal of the Optical Society of America B* 21, 1889 (2004)
- [6] "Single-Atom Trapping in Holographic 2D Arrays of Microtraps with Arbitrary Geometries", F. Nogrette, H. Labuhn, S. Ravets, D. Barredo, L. Béguin, A. Vernier, T. Lahaye, and A. Browaeys, *Phys. Rev. X* 4, 021034 (2014)

<sup>1</sup>Ce travail a bénéficié d'un financement de la part du Laboratoire d'Excellence Physique Atome Lumière Matière (LabEx PALM) dans le cadre d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir portant la référence ANR-10-LABX-0039.