

## Optique binaire pour la mise en forme spatiale de faisceaux laser IR, visible et UV

M. Fromager<sup>1</sup>, N. Passilly<sup>1</sup>, R. de Saint Denis<sup>1</sup>, E. Cagniot<sup>1</sup> et K. Aït-Ameur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Équipe Lasers, Instrumentation Optique et Applications, Centre Interdisciplinaire de Recherche Ions Lasers, Unité Mixte 6637 CEA-CNRS-ENSICAEN et Université de Caen, 6 Bd. Maréchal Juin, 14050 Caen, France*  
e-mail : [kamel.aitameur@ensicaen.fr](mailto:kamel.aitameur@ensicaen.fr)

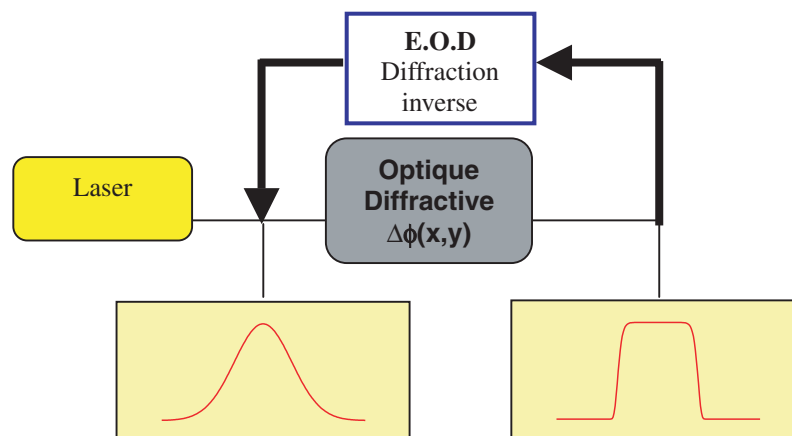
**Résumé.** Nous montrons les possibilités de mises en forme d'amplitude et de polarisation des faisceaux laser qu'offrent quelques Eléments Optiques Diffractifs binaires simples.

### 1. INTRODUCTION

La plupart des applications scientifiques, médicales et industrielles des lasers ne peuvent se satisfaire d'un faisceau ayant une distribution gaussienne d'intensité dans un plan transverse. Dans ce cas, il est alors nécessaire de transformer le profil d'intensité du faisceau laser. Une solution est l'introduction sur son parcours d'un Elément Optique Diffractif (EOD) dont le profil de phase  $\Delta\phi(x,y)$  permettra, après diffraction, la mise en forme souhaitée dans le plan focal d'une lentille. Ce profil de phase  $\Delta\phi(x,y)$  est déterminé numériquement à l'aide d'algorithmes de diffraction inverse (Fig. 1).

L'étape suivante est de réaliser l'EOD qui sera capable d'introduire le déphasage  $\Delta\phi(x,y)$  sur le faisceau incident. Les EOD peuvent être classés en dispositifs reconfigurables ou non-reconfigurables. Les dispositifs reconfigurables sont à base de valves optiques à cristaux liquides qui permettent la mise en forme spatiale de faisceaux du continu aux impulsions femtosecondes (Fig. 2). Ces EOD relèvent des techniques générales de l'optique adaptative. Ils sont coûteux et ne conviennent pas pour les faisceaux à forte densité d'énergie ou dans le domaine ultra-violet.

Les dispositifs non-reconfigurables consiste en un matériau transparent (verre, quartz) dans lequel est gravé le profil de phase  $\Delta\phi(x,y)$  de manière continue ou discrète (32 ou 64 niveaux de gravure) mais



**Figure 1.** L'optique diffractive au service de la mise en forme spatiale.

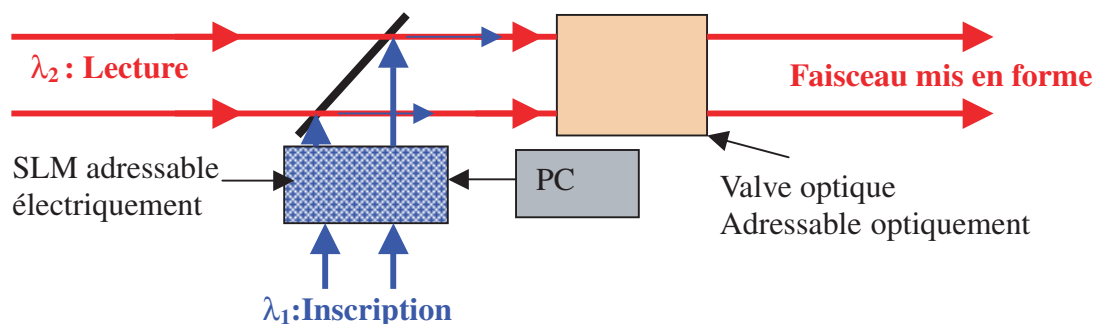


Figure 2. Élément Optique Diffractif reconfigurable.

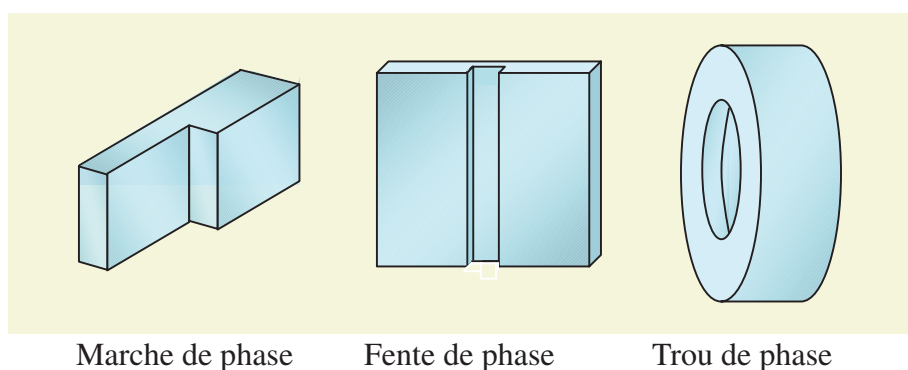


Figure 3. EOD binaire.

ces dispositifs présentent l'inconvénient d'être coûteux. Les techniques de fabrication sont celles de la microélectronique (photolithogravure chimique ou par faisceaux d'ions). Cela nous a amené au CIRIL à développer par des moyens technologiques relativement modestes des EOD binaires qui ont l'avantage de ne nécessiter qu'un seul niveau de gravure (Fig. 3).

Ces EOD binaires ont été utilisés soit pour une application dite « simple-passage » pour mettre en forme l'intensité d'un faisceau laser (§2), soit à l'intérieur d'une cavité laser afin d'améliorer une de ses performances (§3).

## 2. MISE EN FORME D'AMPLITUDE « SIMPLE PASSAGE »

### 2.1 Le trou de phase

Le trou de phase consiste en un matériau transparent d'indice  $n$  et présentant un trou circulaire de profondeur  $h$  (Fig. 4) qui introduit un déphasage  $\phi = 2\pi(n - 1)h/\lambda$ . Dans les calculs et les expériences on a considéré le cas  $\phi = \pi$  qui permet de réaliser des mises en forme intéressantes.

L'espace qui est situé derrière le trou de phase peut être divisé en deux zones, l'une dite de champ proche et l'autre champ lointain. Il est commode d'étudier pour un tel dispositif, ne présentant qu'un ordre de diffraction, la distribution longitudinale d'intensité ainsi que la distribution transverse d'intensité dans ces deux zones (Fig. 6). A titre de comparaison, nous avons représenté les distribution d'intensité obtenues pour le trou de phase et le diaphragme ordinaire de rayon  $b$ , lorsque le faisceau incident est gaussien.

Nous avons aussi utilisé un plot de phase qui consiste à déposer sur du verre une couche mince d'ITO qui ensuite après gravure assure la même fonctionnalité que le trou de phase (Fig. 5).

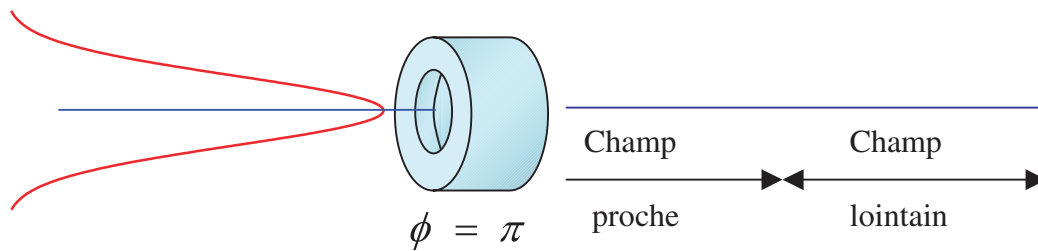


Figure 4.

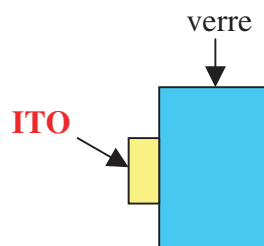
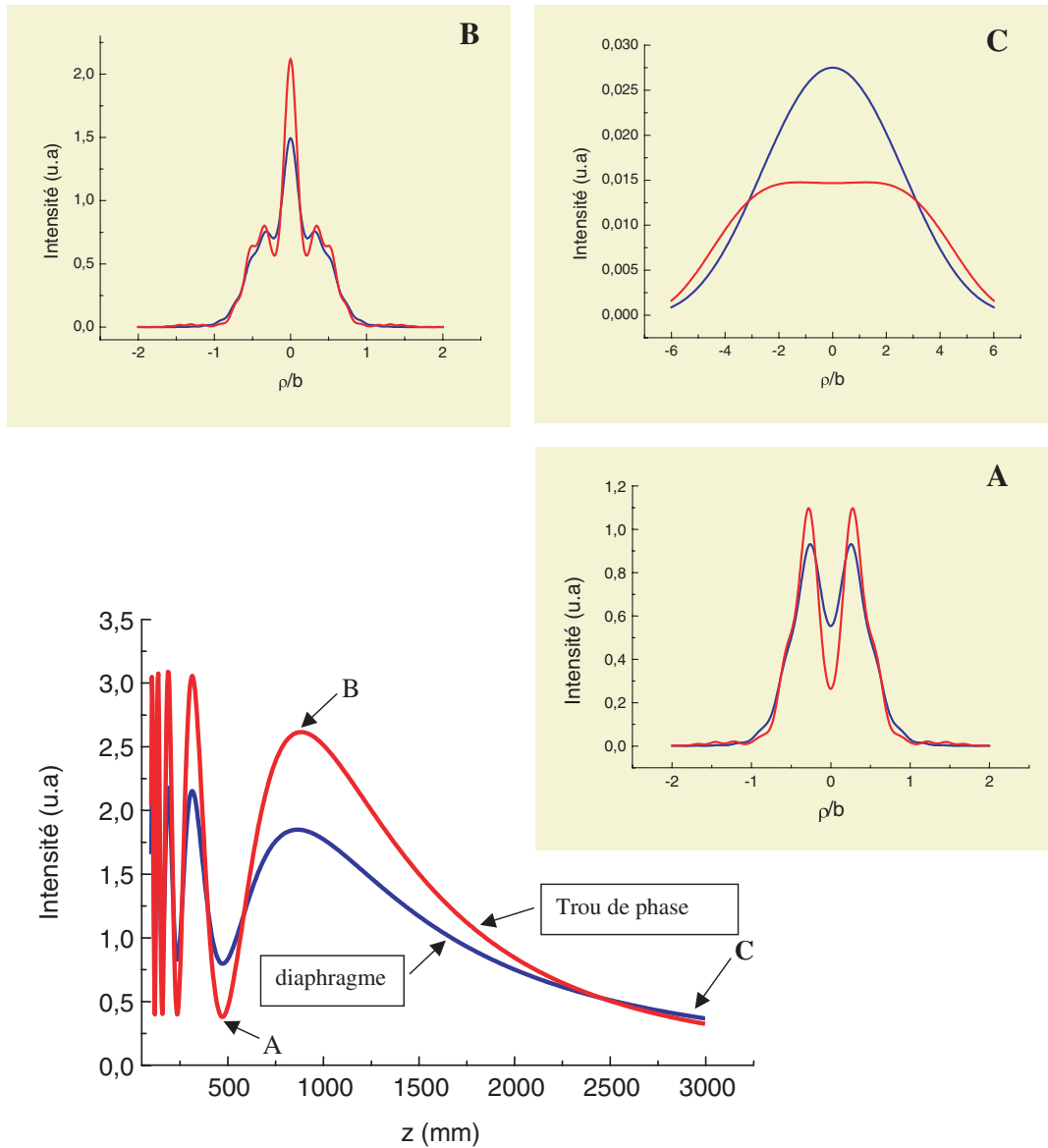


Figure 5.

Le champ proche des deux types d'ouverture est similaire : la position des maxima et minima d'intensité sur l'axe est identique. L'interprétation peut en être faite en termes de zones de Fresnel. En effet chaque fois qu'un nombre impair de zones est à l'intérieur de l'ouverture de rayon  $b$ , on obtient un maximum d'intensité sur l'axe. Si le nombre de zones de Fresnel dans l'ouverture est pair alors l'intensité sur l'axe est minimum [1]. La différence entre les deux faisceaux diffractés se révèle en champ lointain puisque le faisceau gaussien se diffractant sur le diaphragme ordinaire redevient quasi-gaussien alors que celui qui a traversé le trou de phase est uniformisé. Cette mise en forme particulière correspond au paramètre de troncature  $\Delta = b/W$  qui vaut 1,25 ;  $W$  représentant la largeur du faisceau incident. Les autres mises en forme possible qui peuvent être obtenues à l'aide du trou de phase sont accessibles en changeant le paramètre  $\Delta$  comme le montre la figure 7. Le faisceau gaussien, à la traversée d'un trou de phase, peut être transformé en super-gaussienne d'ordre 6, en doughnut dont la dépression centrale est continûment ajustable, en  $TEM_{10}$ .

Nous avons récemment revisiter les performances d'un trou de phase en matière de mise en forme spatiale en considérant la « portée longitudinale de transformation » et le facteur  $M^2$  du faisceau transformé. La portée longitudinale de la transformation notée BSLR (beam shaping longitudinal range) exprime l'étendue longitudinale, de part et d'autre du plan focal, du maintien de la transformation du profil d'intensité. Par exemple, pour le cas de la transformation gaussien  $\rightarrow$  super-gaussien, la figure 8 montre que si l'on s'écarte du plan focal cette transformation n'est plus réalisée. Le paramètre BSLR exprime justement cette frontière. Pour  $\Delta = 1,25$  on obtient une portée longitudinale de transformation qui vaut  $\pm z_R/5$ , où  $z_R$  représente la distance de Rayleigh du faisceau gaussien incident. Le paramètre BSLR a une grande importance pratique. Par exemple, si l'application envisagée est le pompage longitudinal d'un cristal laser par un faisceau de pompage mis en forme, il faut veiller à choisir une épaisseur de cristal inférieure au paramètre BSLR. Une autre caractéristique importante du faisceau mis en forme est sa brillance  $B = \pi^2 P / (\lambda M^2)^2$ , où  $P$  représente sa puissance. Il est essentiel d'évaluer la baisse de brillance, i.e. l'augmentation du facteur  $M^2$ , occasionnée par la mise en forme. La figure 9 montre l'évolution de la dégradation du facteur  $M^2$  en fonction du paramètre de troncature  $\Delta$ .



**Figure 6.** Distributions d'intensité d'un faisceau gaussien diffracté par un trou de phase.

## 2.2 La fente de phase

La fente de phase est composée de deux marches de phase (Fig. 10) qui sont positionnées parallèlement et capables de glisser l'une sur l'autre afin que la largeur de la zone de déphasage puisse être continûment ajustable (Fig. 11).

La particularité de la fente de phase est qu'elle transforme le profil d'intensité du faisceau incident, comme le trou de phase, mais dans une seule direction [2]. Il s'agit d'une mise en forme 1-D que l'on désire mettre en œuvre pour la mise en forme d'un faisceau laser UV à 248 nm destiné au recuit de couches minces de silicium amorphe. Le test de notre fente de phase a été effectué dans le visible à 532 nm (Fig. 12).

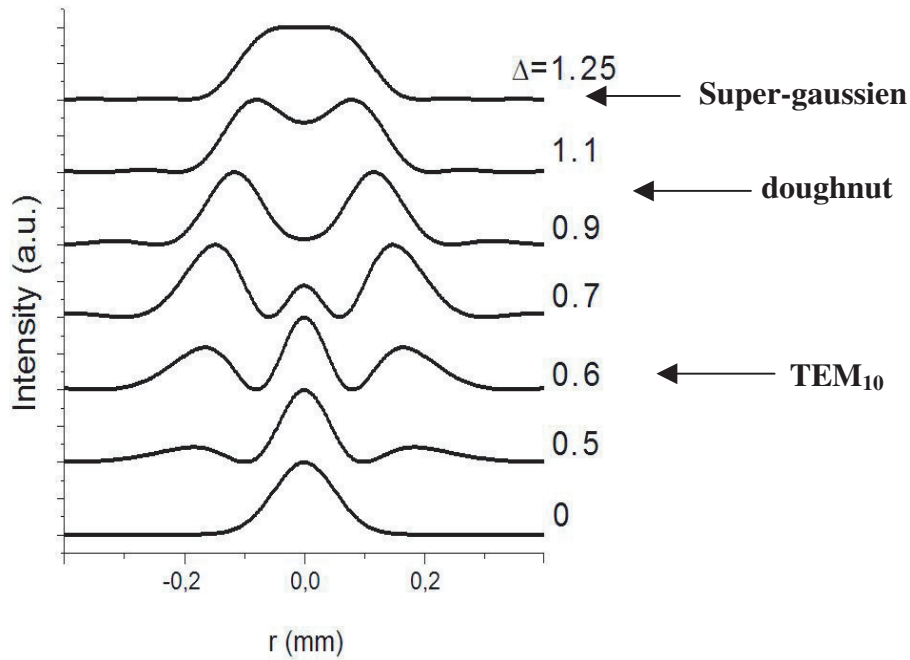


Figure 7. Les différents types de mise en forme réalisées par un trou de phase.

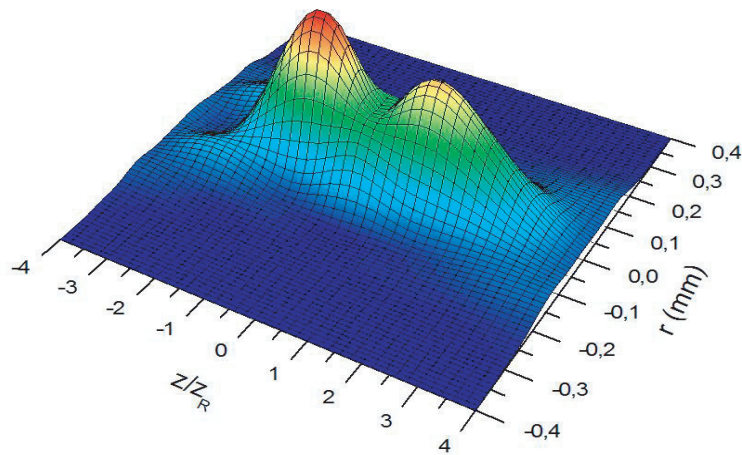


Figure 8.

Une autre fonctionnalité intéressante de la fente de phase peut être pressentie en considérant la divergence angulaire du faisceau diffracté à la sortie du trou de phase précédent comme le montre la figure 13. On peut qualifier le trou de phase d'amplificateur de divergence. Nous avons utilisé cette propriété pour circulariser un faisceau laser elliptique, émis par exemple par une diode laser de faible puissance dont le rapport de forme est inférieur à 3, en lui faisant traverser une fente de phase déphasant de  $90^\circ$  [3].

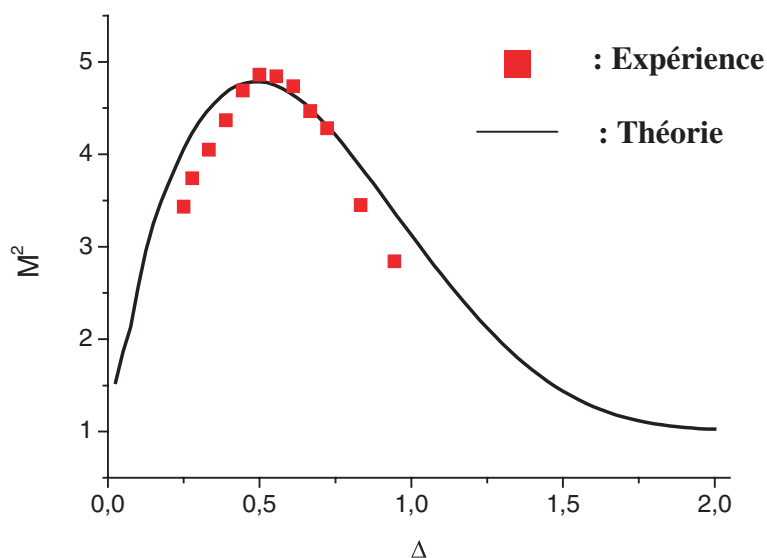


Figure 9. Facteur  $M^2$  du faisceau mis en forme par le trou de phase.

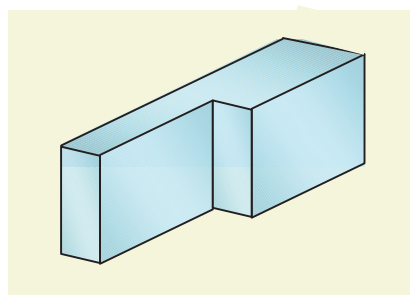


Figure 10.

### 2.3 Le diaphragme

Est-il possible de transformer un mode transverse d'ordre élevé en un faisceau quasi-gaussien (Fig. 14) à l'aide d'un EOD binaire de phase. La réponse est oui mais avec l'inconvénient de conserver le facteur  $M^2$  initial [4]. En d'autres termes cela signifie que cette transformation du profil spatial d'intensité n'est pas accompagnée d'une amélioration de la brillance du faisceau.

Nous nous sommes intéressés à l'effet de la troncature d'un faisceau de Laguerre Gauss symétrique d'ordre élevé se produisant lors de la traversée d'un diaphragme ordinaire. Les faisceaux incident et diffractés étant caractérisés par leur facteur  $M^2$  et leur brillance. Le faisceau incident est un  $TEM_{p0}$ , dont le facteur  $M^2$  s'écrit  $M^2 = 2p + 1$ , est composé d'un pic central entouré de  $p$  anneaux lumineux (Fig. 15).

La figure 16 montre la variation du facteur  $M_{out}^2$  en fonction du paramètre de troncature  $\Delta$  du diaphragme lorsque l'onde incidente est un faisceau  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{10}$ ,  $TEM_{20}$  ou  $TEM_{30}$ . On constate que tronquer le faisceau réduit son facteur  $M^2$  sauf pour le cas  $TEM_{00}$  pour lequel le facteur est régulièrement dégradé quand on ferme le diaphragme. On constate que  $M_{out}^2$  approche la valeur unité lorsque le diaphragme découvre uniquement le pic central et que tous les anneaux ont disparu.

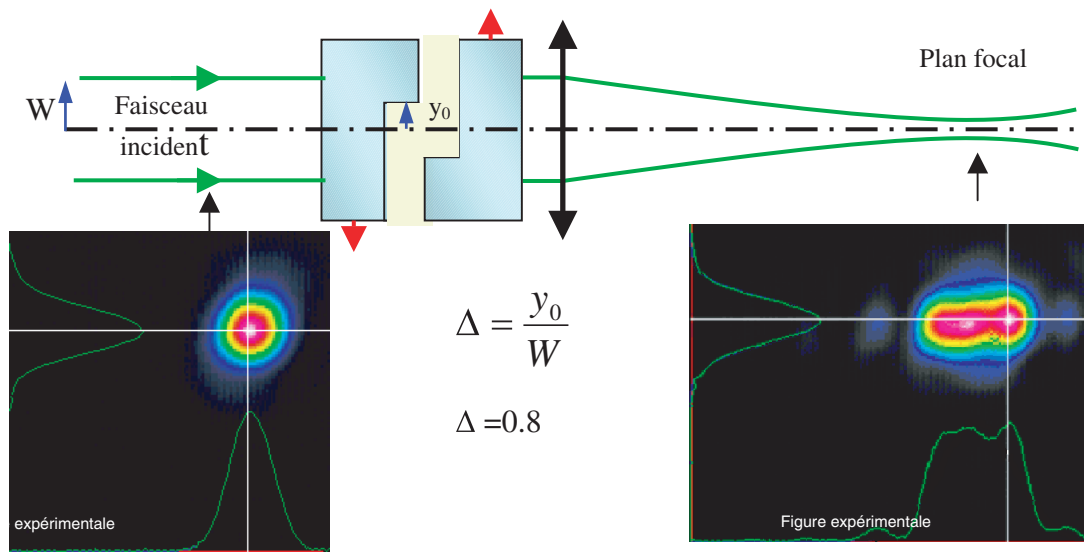


Figure 11.

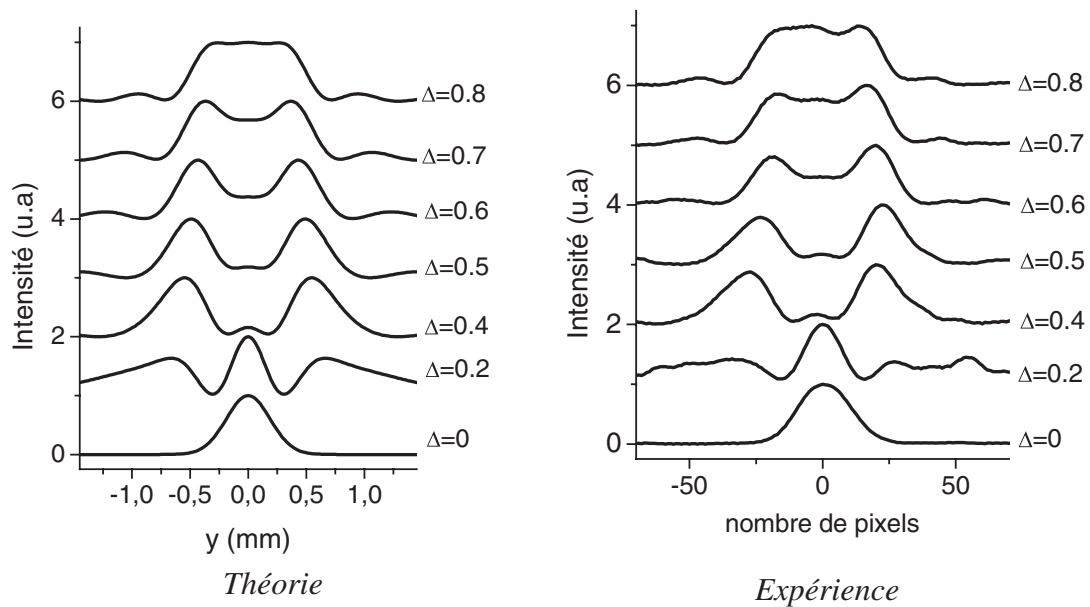
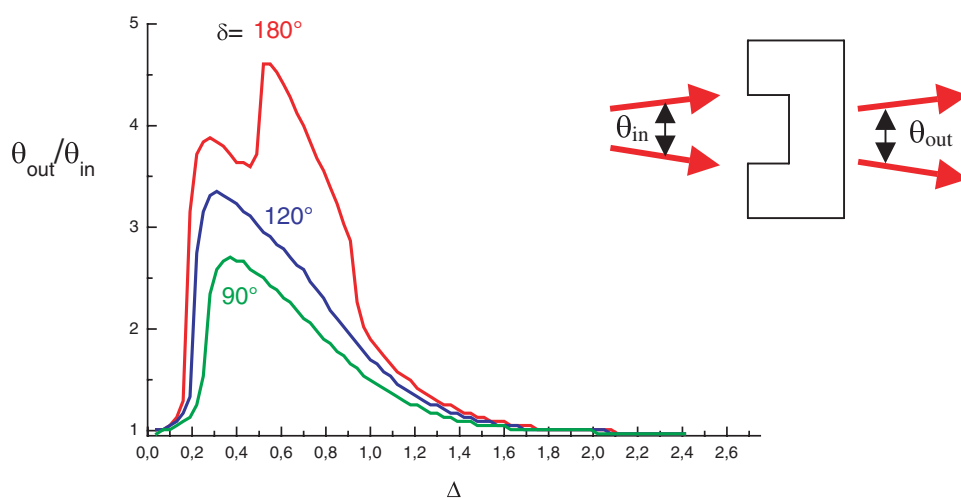


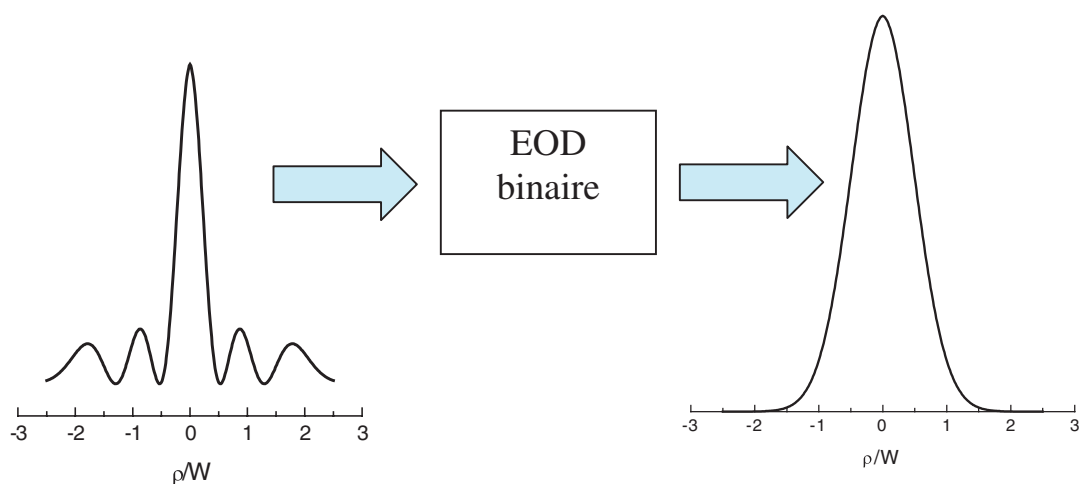
Figure 12.

Il est important de noter qu'au fur et à mesure que l'on ferme le diaphragme sa transmission diminue, de telle sorte que la brillance en sortie est plus inférieure à celle du faisceau  $TEM_{00}$  d'entrée. Par contre pour les faisceaux d'ordre supérieur, on constate que la brillance en sortie est supérieure à la brillance d'entrée lorsque le faisceau est débarrassé de tous ses anneaux [5].

Une autre application de la mise en forme simple passage mettant en œuvre un EOD binaire simple concerne la transformation de polarisation. L'insertion de deux marches de phase dans les bras d'un interféromètre vectoriel de Mach-Zehnder permet la transformation d'un faisceau gaussien polarisé



**Figure 13.** Le trou de phase : Un amplificateur de divergence.



**Figure 14.** Transformation d'un faisceau d'ordre élevé en un faisceau quasi-gaussien.

rectilignement en un faisceau creux polarisé radialement [7]. Cette polarisation particulière permet la génération d'une composante longitudinale de champ électrique intense au foyer d'une lentille.

### 3. MISE EN FORME « INTRA-CAVITÉ »

Il est bien connu que l'introduction d'un dispositif optique à l'intérieur d'une cavité optique exalte en général ses propriétés « simple passage ». Nous avons suivi cette démarche en examinant si l'introduction d'un trou de phase améliorerait ou non les performances d'une cavité laser. Nous avons montré que l'introduction d'un trou déphasant ( $\pi/2$ ) dans une cavité plano-concave améliore fortement sa capacité à discriminer les modes transverses d'ordre élevé [6]. Grâce à un couplage des effets spatiaux et temporels, nous avons montré que l'introduction d'un trou de phase à l'intérieur d'un laser Cr : LiSAF fonctionnant en régime auto-déclenché [8] est en mesure d'accélérer la dynamique de son fonctionnement [9].



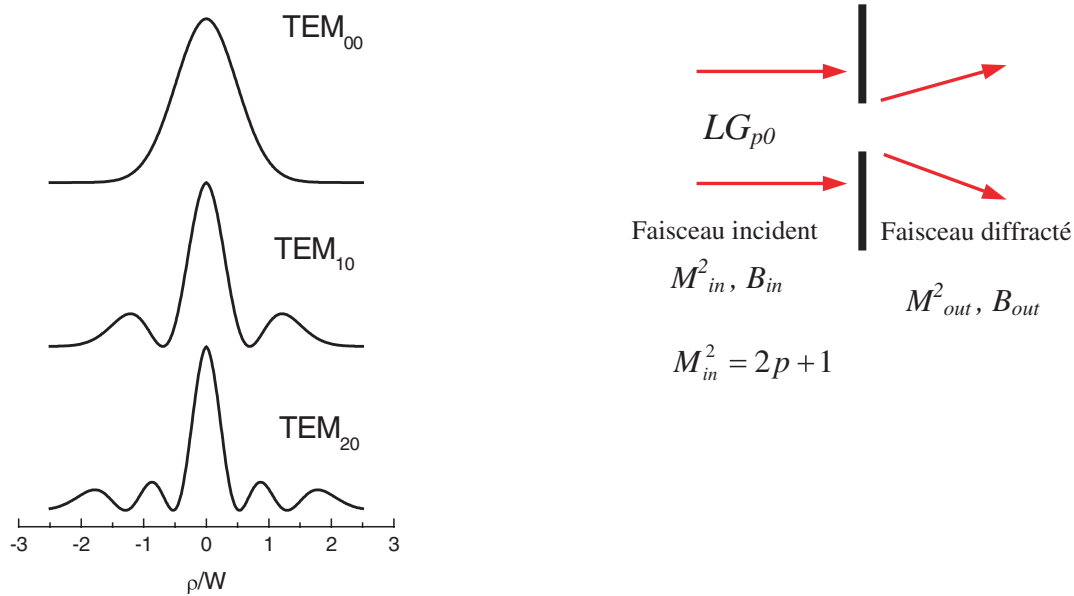


Figure 15.

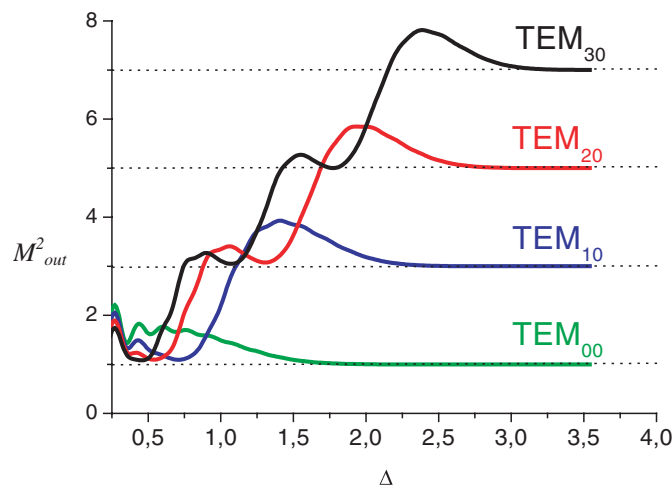
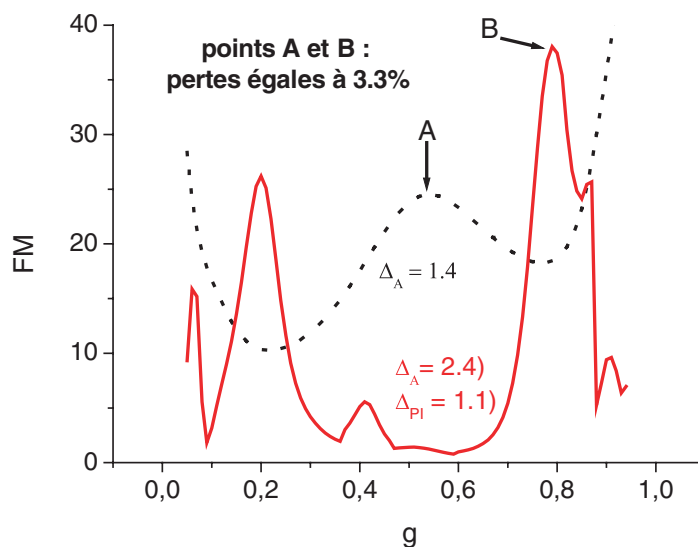


Figure 16.

Récemment, nous nous sommes intéressés à la possibilité d'améliorer la brillance d'un laser grâce à l'utilisation d'un trou de phase intra-cavité. L'idée de base est de faire en sorte d'optimiser, non pas la puissance  $P$  en sortie du laser, mais plutôt sa brillance  $B = \pi^2 P / (\lambda M^2)^2$ . Si l'on considère le cas d'un laser à 4 niveaux, on peut montrer que la brillance en sortie du laser est proportionnelle au facteur de mérite suivant:

$$FM = \frac{\eta}{L_0(M^2)^2},$$

où  $\eta$  est le volume du mode fondamental normalisé par le volume du mode gaussien non perturbé,  $L_0$  représente les pertes du mode fondamental. L'introduction d'un trou de phase dans une cavité



**Figure 17.** Amélioration de la brillance du mode fondamental d'une cavité laser.

plano-concave diaphragmée augmente le volume du mode mais malheureusement détériore la qualité du faisceau [10] et est indirectement la cause de l'augmentation des pertes .

Nous avons récemment montré que la présence d'un trou de phase de diamètre judicieusement choisi contre le miroir concave permet d'augmenter jusqu'à 60% la brillance du laser (point B de la figure 17) par rapport au cas de la cavité ne comportant qu'un diaphragme ordinaire (point A de la figure 17) sans changer le seuil d'oscillation [11]. La quantité  $\Delta_A$  ( $\Delta_{P1}$ ) représente le paramètre de troncature associé au diaphragme (trou de phase) et  $g$  le paramètre géométrique de la cavité plano-concave. On génère un mode fondamental perturbé ( $M^2 > 1$ ) qui conduit tout de même à une brillance supérieure à celle obtenue avec un faisceau gaussien

## Références

- [1] R. Bourouis, K. Aït-Ameur, H. Ladjouze, J. Mod. Optics **44** (1997) 1417-1427.
- [2] N. Passilly, M. Fromager, L. Méchin, C. Gunther, S. Eimer, T. Mohammed-Brahim, K. Aït-Ameur, Opt. Commun. **241** (2004) 465-473.
- [3] M. Fromager, K. Aït-Ameur, Opt. Commun., **190** (2001) 45-49.
- [4] A.E. Siegman, Opt. Lett., **18** (1993) 675-677.
- [5] N. Passilly, G. Martel, K. Aït-Ameur, J. Mod. Optics, **51** (2004) 2279-2286.
- [6] K. Aït-Ameur, F. Sanchez, M. Brunel, Opt. Commun., **184** (2000) 73-78.
- [7] N. Passilly, R. de Saint Denis, K. Aït-Ameur, F. Treussart, R. Hierle, J.-F. Roch, J.O.S.A. A **22** (2005) 984-991.
- [8] M. Fromager, K. Aït-Ameur, Opt. Commun., **191** (2001) 305-314.
- [9] N. Passilly, M. Fromager, K. Aït-Ameur, Appl. Optics, **43** (2004) 5047-5059.
- [10] K. Aït-Ameur, J. Mod. Optics, **49** (2002) 1157-1168.
- [11] R. de Saint Denis, N. Passilly, K. Aït-Ameur, Opt. Commun., in press (2006).