

TECHNIQUES DE MESURE DES PARAMÈTRES TRANSVERSES D'UN FAISCEAU LASER : SOURCES D'ERREUR

Mohammed TRAÏCHE¹ et Kamel AÏT-AMEUR²

¹Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA),

B.P. 17, Cité 20 Août 56, Baba Hassen, 16303 Alger

²Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique, UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN
et Université de Caen, CIMAP-ENSICAEN, 6 Bd Maréchal Juin, F-14050 Caen, France

E-mail : mtraiche@cdta.dz

RÉSUMÉ : Dans cette contribution, nous traitons de deux sources d'erreur susceptibles d'entamer la précision de mesures effectuées sur les paramètres transverses d'un faisceau laser : la fluctuation transverse du faisceau laser et la non corrélation entre le centre et l'aile du faisceau Gaussien diffracté même légèrement. Celle-ci donne parfois des résultats contraires à la réalité physique du faisceau laser.

MOTS-CLÉS : faisceau laser, paramètres transverses, diffraction, Zscan, EZscan, effets non-linéaires

1. Introduction

Dans la caractérisation d'un faisceau laser pour obtenir ses paramètres, l'opérateur peut recourir à plusieurs techniques de mesure. L'une d'elles, au cas où l'opérateur n'est pas sûr de la forme spatiale Gaussienne du faisceau, consiste à relever son profil transverse d'intensité à plusieurs positions axiales par rapport au laser émetteur et reconstituer ainsi sa caustique. Cela permet d'accéder à sa divergence, à la taille de son point de pincement connaissant sa longueur d'onde d'émission, à sa qualité de faisceau et par là même à sa brillance en prenant préalablement le soin de mesurer sa puissance. Cette méthode peut s'avérer simple ou onéreuse selon l'équipement existant au laboratoire. Mais elle est la plus fiable car l'accès aux paramètres transverses du faisceau est direct à partir de la largeur des profils relevés. Si par contre le faisceau est de distribution Gaussienne dans le cas, par exemple, où une disposition particulière est prise à l'intérieur de la cavité laser pour émettre un faisceau Gaussien, l'on peut recourir directement à une mesure de divergence au champ lointain. Cela en relevant par exemple le profil derrière une lentille placée en région de champ lointain et le point de pincement au point focal. Maintenant si cette divergence varie dans le temps sur une impulsion d'un faisceau pulsé l'on peut recourir à d'autres techniques telles que l'utilisation d'un diaphragme ou d'un stop placé en champ lointain et la mesure de la transmission de puissance outre ce composant. Le tracé temporel de cette transmission permet de déduire celui de la divergence et par suite celui de la largeur du point de pincement du faisceau. Cette mesure permet ainsi de caractériser un effet lentille quelconque affectant le faisceau et remonter à son origine : thermique, électronique ou optique. D'autres techniques dans ce contexte comme le Zscan [1], le EZscan [2] peuvent être mises à contribution pour relever la variation spatio-temporelle des paramètres transverses du faisceau.

Au cours de ces mesures des sources d'erreur peuvent se présenter. Comme l'instabilité de pointage du faisceau qui entraîne des défauts d'alignement des optiques et comme de légers effets de diffraction sur les bords de ces optiques conduisant parfois à des résultats tout à fait contraires à la réalité. Dans cette communication nous mettrons l'accent sur ces aspects.

2. Fluctuation transverse du faisceau

Tous les faisceaux lasers fluctuent transversalement. Cette fluctuation est donnée par les constructeurs en terme de stabilité de pointé « *pointing stability* ». De sorte que si l'on trace un trait point par point au laser il apparaît comme le montre figure 1 ci-dessous.

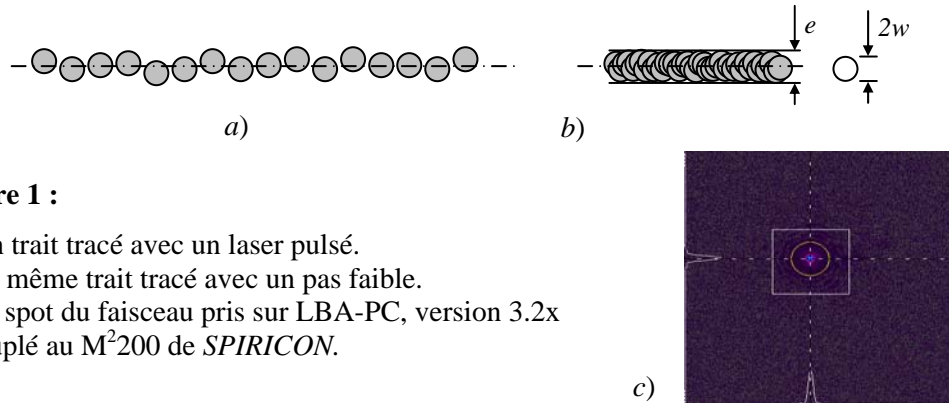


Figure 1 :

- a) Un trait tracé avec un laser pulsé.
- b) Le même trait tracé avec un pas faible.
- c) Le spot du faisceau pris sur LBA-PC, version 3.2x couplé au M²200 de SPIRICON.

Cette fluctuation aléatoire est à la fois transverse et angulaire, donnée néanmoins pour des raisons pratiques inscrite dans un angle majoré. Ex. $p_s < 50 \mu\text{rad}$. Sa valeur donnée par le constructeur peut ne pas être exacte car elle dépend des conditions opératoires de sa mesure. Sur une impulsion relaxée d'un laser pulsé, elle varie d'un pic à l'autre comme on le verra plus loin. En outre, elle est sujette à modification par les optiques utilisées en dehors du laser. Elle est disjointe de la divergence angulaire θ du faisceau. Celle-ci est inscrite entre l'axe du faisceau et son aile. Et donc n'oscille pas. Dans les lasers à solide pulsés, la fluctuation transverse provient soit des vibrations imprimées au milieu actif par le flux turbulent du fluide refroidisseur [3] si c'est le cas, soit de l'onde acoustique générée par le pompage optique [4]. En régime de pompage continu, elle naît des fluctuations dans les zones de recouvrement entre la région du gain et la région d'oscillation. Dans les milieux actifs fluides (lasers à gaz et à colorants) des turbulences dans le volume du gain impriment les mêmes fluctuations transverses au faisceau laser émis. Un schéma où cet inconvénient est minime consiste en le pompage axial par diode laser couplé au milieu amplificateur solide par fibre optique.

Dans le cas où un trait comme celui de figure 1 est tracé, par exemple dans la gravure d'un masque destiné à la lithographie, la stabilité de pointé doit être intégrée dans le calcul de dimensionnement du montage expérimental. Sinon au point focal de la lentille utilisée, de focale f , une erreur supplémentaire de $100 \times (e/2w - 1) \% = 100 \times (p_s f / 2w) \% = 100 \times (p_s / \theta) \%$ est introduite. Dans le cas où des contraintes sont imposées par l'effet de bord, le pas entre deux impacts en figure 1-b) doit être choisi en conséquence. Figure 1-b) présente une façon courante de mesurer la stabilité de pointé sur un nombre suffisant d'impacts relevés par un détecteur sensible à la position au foyer d'une lentille [5-7]. Une mesure plus fiable est faite de la même façon mais en prenant non pas l'impact de figure 1-b) mais son spot en figure 1-c) sur la caméra CCD d'un analyseur de faisceau (Laser Beam Analyser LBA). Une autre technique de mesure angulaire consiste en le relevé de la différence de transmission en incidence oblique sur une fenêtre de silice fondue [8].

Une autre façon de mesurer la stabilité de pointé d'un faisceau consiste à relever son profil transverse d'intensité à l'aide d'un schéma de manip comme celui de figure 2. Dans ce schéma, le laser rubis émet des impulsions relaxées. On utilise la transmission par un diaphragme de faible ouverture pour scanner transversalement le faisceau. En figure 2,

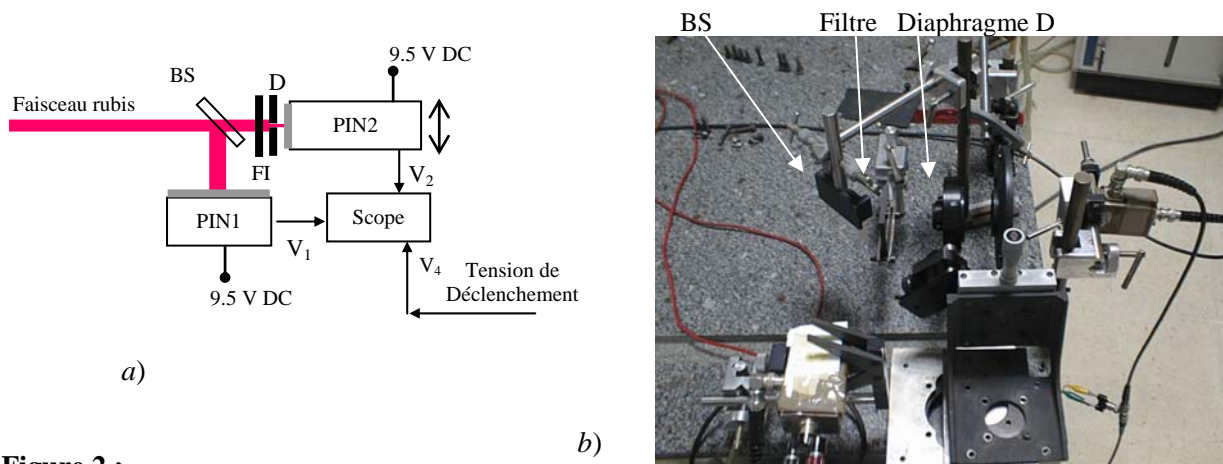
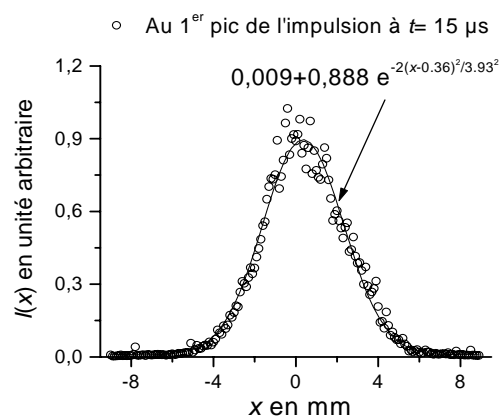


Figure 2 :

a) Schéma du relevé de profil transverse du faisceau rubis par un diaphragme D de $\varnothing 0.6$ mm couplé à la PIN1 et distant de 10 m du laser. FI est un filtre interférentiel à 6943 \AA et BS un beam splitter : 50% à 45° à 6943 \AA . PIN2 et D sont solidaires, montés à une table micrométrique qui effectue un mouvement transverse par pas de 0.3 mm.

b) Photo montrant cette manip.

c) Le profil du 1^{er} pic de l'impulsion relaxée.



l'ouverture du diaphragme est de 7.6 % de la largeur du faisceau. Avec un nombre suffisant de points comme en figure 2-c), l'erreur de fit est de 0.06 mm en largeur. Ce qui donne une stabilité de pointé $p_s = 2 \times 0.06 \text{ mm} / 10 \text{ m} = 12 \mu\text{rad}$. Les pics suivants présentent des valeurs de plus en plus élevées jusqu'à un maximum de $p_s = 120 \mu\text{rad}$. Cela montre que les pics d'une impulsion relaxée présentent des valeurs différentes en stabilité de pointé. Le laser rubis en figure 2 présente une divergence au champ lointain $\theta = 0.7 \text{ mrad}$. Cela signifie que son utilisation en régime relaxé pour tracer un trait comme en figure 1-a) s'accompagne d'une erreur sur la linéarité de 17 %.

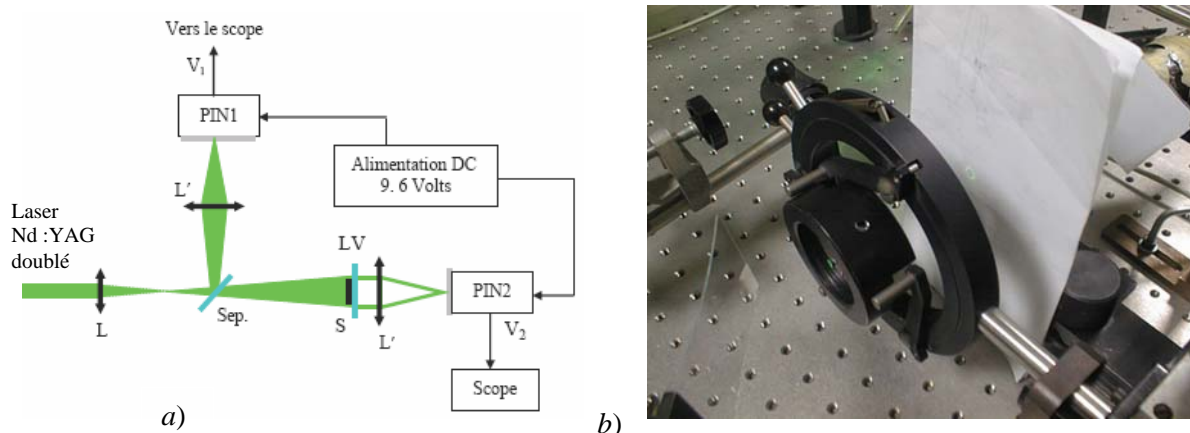


Figure 3 : a) Schéma de mesure de la transmission par un stop S. LV est une lame de verre. b) Le cercle lumineux derrière le stop peut servir pour aligner le stop. Combien même il induit en erreur lorsque l'on travaille à sensibilité de mesure élevée.

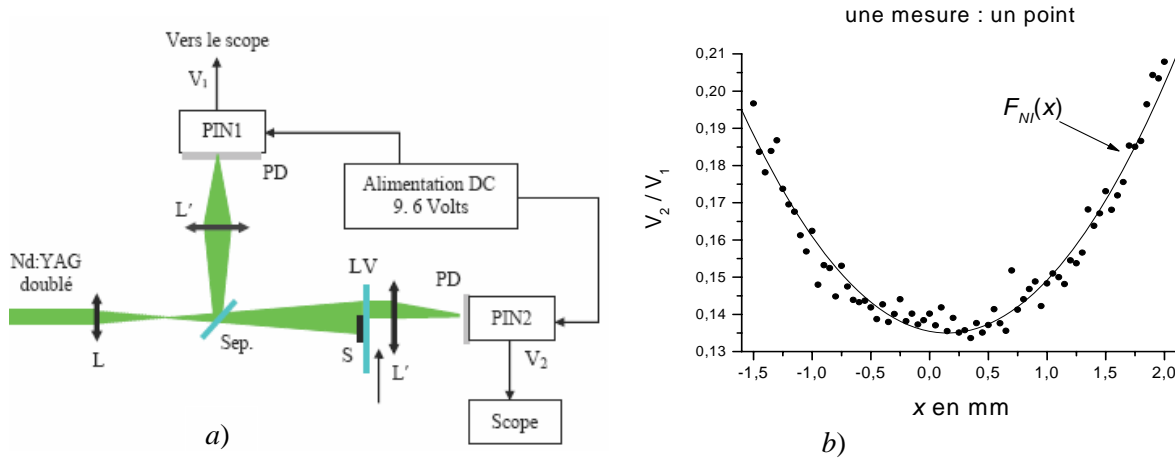


Figure 4 : a) Schéma d'alignement du stop. b) Evolution du signal outrepassant le stop

Maintenant, nous nous intéresserons aux précautions que l'opérateur doit prendre en considération afin d'éviter les erreurs systématiques. Figure 3 montre un montage où un faisceau laser Nd :YAG doublé est utilisé pour relever la transmission par un stop S. Dans certaines conditions [2] où l'on doit travailler à sensibilité élevée, le facteur d'interception du faisceau par le stop $S = 1 - \exp(-2a^2 / w^2)$ doit être élevé. Disons $S > 98\%$. Ici $2a$ est le diamètre du stop et $2w$ la pleine largeur du faisceau. Des formules semi-empiriques [2] existent dans la littérature et ne sont valables que sous cette condition. Le facteur d'interception S pour être fiable doit être mesuré dans les conditions de manipulation. Le laser étant pulsé, son énergie fluctue dans le temps. Le schéma de manip en fig.3-a) est adopté en général pour soustraire cette fluctuation. Et pour aligner le stop l'on peut jauger sur l'uniformité du cercle lumineux derrière. Toutefois, sous la condition $S > 98\%$, ce cercle peut ne pas apparaître. Dans tous les cas, les fluctuations spatiales transverses du faisceau font que le cercle lumineux, vu de visu ou au moyen d'une caméra CCD, ne peut donner lieu à un bon alignement du stop. C'est le balayage transverse à petit pas de celui-ci qui donne la position centrale adéquate du stop par rapport à la section du faisceau. On le voit en figure 4 où la position x optimale est soit déterminée à vue d'œil sur le graphe, soit en fittant avec une fonction appropriée.

De même, la mesure du facteur d'interception S doit être effectuée en prenant la moyenne quadratique d'un nombre suffisant de rapports V_2/V_1 comme en figure 3-a) avec stop centré et sans stop. Le rapport entre les deux situations permet de donner une valeur pour S affranchie du bruit induit par les fluctuations transverses du faisceau. Figure 5 présente la technique EZscan [2] où l'on scanne un échantillon semi-transparent au faisceau au travers de sa région focale (selon z). On relève sa transmission par un stop placé en champ lointain. Le tracé de cette transmission en fonction de z donne à la fois et le signe et la valeur de la non linéarité que le matériau est susceptible de présenter. Cette technique très sensible est recommandée dans le cas où l'absorption par l'échantillon est faible. Néanmoins, les fluctuations transverses du faisceau imposent à l'opérateur deux branches similaires : une branche signal et une branche référence, pour relever une transmission normalisée propre. Les deux stops doivent être alignés de la même façon qu'en figure 4.

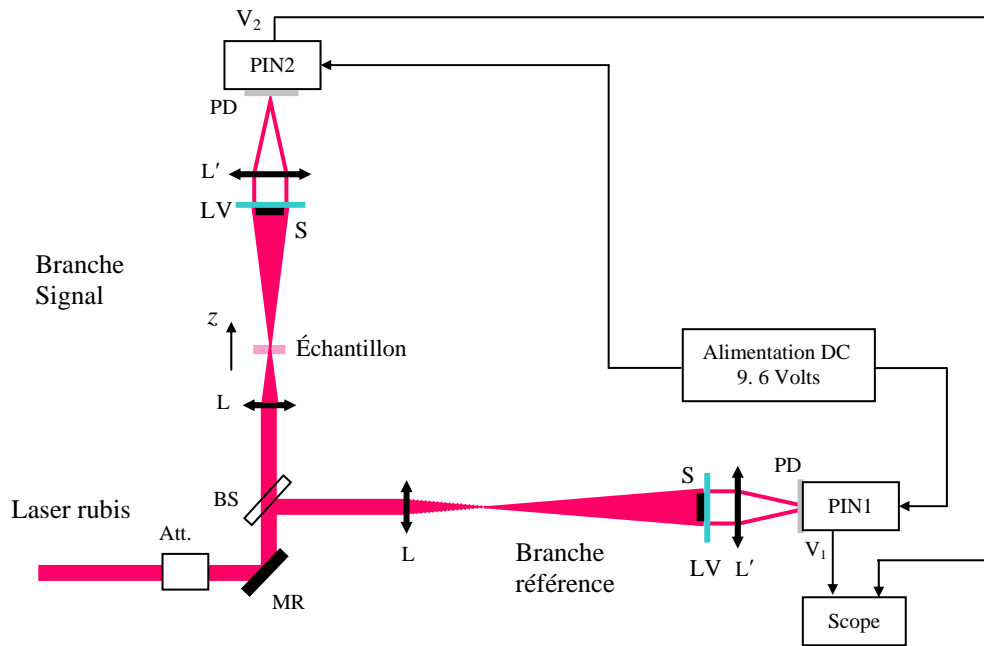


Figure 5 : Schéma de montage EZscan [2]. L'échantillon est scanné suivant la direction z . Les deux PINs mesurent la transmission de la partie non éclipsée par le stop.

3. Non corrélation entre le centre et l'aile du faisceau diffracté

La fluctuation transverse du faisceau entache les résultats d'une erreur systématique si des précautions appropriées comme ceux de figures 4 et 5 ne sont pas prises. Cette erreur est imparable dans le cas de figure 1 où les choix sur le laser doivent être appropriés. Cependant si le faisceau utilisé subit une diffraction même faible en champ proche, l'erreur dans un schéma comme celui de figure 6-*b*) peut inverser les résultats [9].

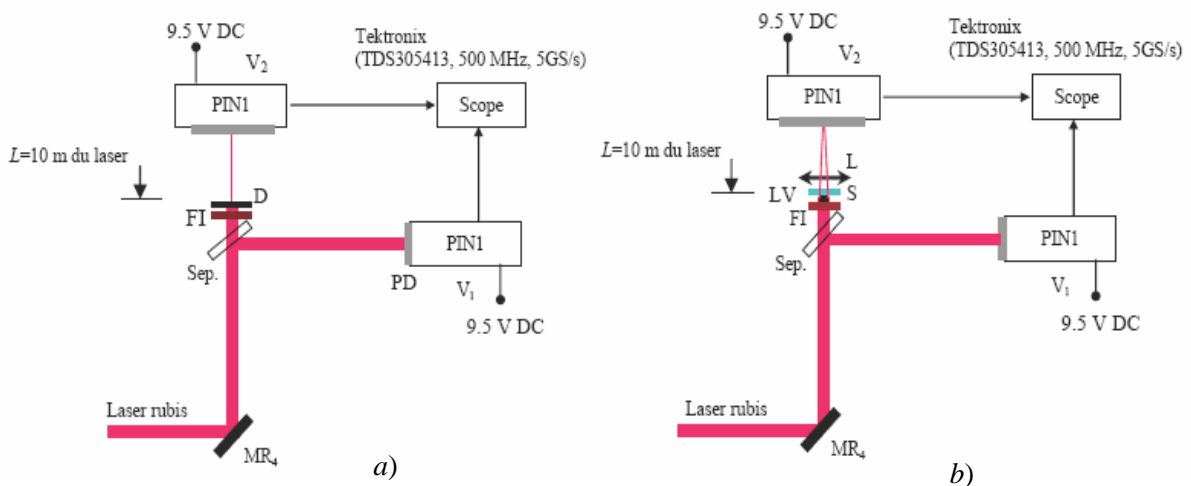


Figure 6 : mesure de la divergence d'un faisceau Gaussien en champ lointain à partir de la transmission *a*) par un diaphragme, *b*) par un stop

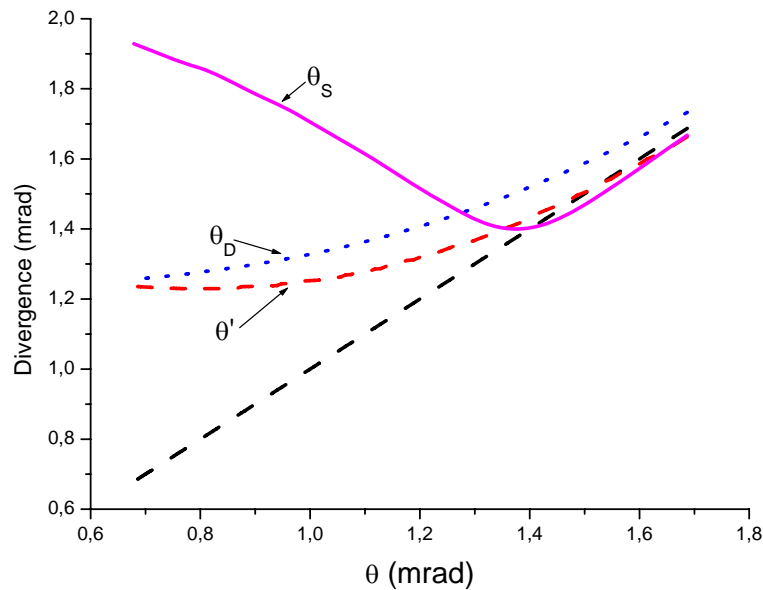


Figure 7 : Tracé théorique, effectué à l'aide de l'intégrale de Fresnel-Kirchhoff, de la divergence à partir de la transmission par le stop (θ_S), par le diaphragme (θ_D) et à partir du profil transverse calculé avant le stop ou diaphragme (θ'). Ceci en fonction de la divergence du même faisceau Gaussien non diffracté [9].

Figure 7 montre le tracé théorique, effectué à l'aide de l'intégrale de Fresnel-Kirchhoff, de la divergence à partir de la transmission par le stop (θ_S), par le diaphragme (θ_D) et à partir du profil transverse calculé avant le stop ou diaphragme (θ') (figure 6). Ceci en fonction de la divergence du même faisceau Gaussien non diffracté [9]. A mesure que la divergence de celui-ci diminue, sa largeur au point de pincement à $z=0$ augmente et devient de plus en plus diffracté par un diaphragme placé centré à cette position. Pour $\theta=1.4$ mrad, où commence à se produire une contradiction entre le résultat donné par le stop et celui donné par le diaphragme, la transmission par le diaphragme du champ proche est de 99.5 %.

Cela montre que même une légère diffraction en champ proche entraîne en champ lointain une altération de la corrélation de l'aile au centre du faisceau.

4- Conclusion

Dans cette contribution nous avons montré que les fluctuations transverses du faisceau induisent une erreur systématique sur la précision voulue dans certaines applications comme l'utilisation du laser en lithographie, son couplage dans une fibre monomode, où son pointage vers une cible distante comme en télé LIBS. Cette erreur est imparable sauf par un choix approprié sur le laser. Nous avons montré également comment cette fluctuation est mesurée et souligné quelques précautions à prendre en sa présence. Plus dramatique encore est la conséquence d'une diffraction en champ proche d'un faisceau Gaussien. Nous avons montré que malgré sa reconstitution presque-Gaussienne en champ lointain, sa partie latérale perd sa corrélation à la partie centrale. L'opérateur doit prendre en considération ces aspects dans toute mesure ou application où leurs effets risquent de se produire.

Références

- [1] Sheik-Bahae M., Said A.A., Wei T.H., Hagan D.J., Van Stryland E.W. ; *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-26** 760-769 (1990).
- [2] Xia T., Hagan D.J., Sheik-Bahae M., Van Stryland E.W. ; *Opt. Lett.* **19**, 317-320 (1994)
- [3] Koechner W. ; *Solid-State Laser Engineering*, **5th Ed. Springer**, Berlin (1999)
- [4] Ait-Ameur K., Kerdja T., Louhibi D. ; *J. Phys. D: Appl. Phys.* **15**, 1667-1672 (1982)
- [5] Lasers and Laser-Related Equipment, Test Methods for Laser Beam Parameters, Beam Positional Stability, *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, **ISO 11670** (1999)
- [6] Maestle R., Plass W., Chen J., Hembd-Soellner C., Giesen A., Tiziani H., Hugel H. ; *Proc. SPIE* **2870**, 319 (1996)
- [7] Levesque M., Mailloux A., Morin M., Galarneau P., Champagne Y., Plomteux O., Tiedtke M. ; *Proc. SPIE* **2870**, 216 (1996)
- [8] Gray J., Thomas P., Zhu X. D. ; *Review of Scientific Instruments* **72**, 3714-3717 (2001)
- [9] Traïche M., Fromager M., Cagniot E., Ait-Ameur K. ; *Optics Communications* **282**, 3854-3858 (2009)