

## Métrie des faisceaux et de la tache focale de la LIL

B. Le Garrec<sup>1</sup>, J.M. Di-Nicola<sup>1</sup>, V. Beau<sup>1</sup> et X. Julien<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA-CESTA, Département Lasers de Puissance, BP. 2, 33114 Le Barp, France  
e-mail : bruno.legarrec@cea.fr

### 1. INTRODUCTION

Le projet Laser MégaJoule (LMJ) [1] initié en 1995 par le Commissariat à l'Energie Atomique a comme objectif d'étudier la fusion par confinement inertiel C'est un laser à verre dopé au Néodyme et triplé en fréquence capable d'irradier avec 240 faisceaux des cibles à un niveau de 1.8 MJ/500 TW à la longueur d'onde de 351 nm. La Ligne d'Intégration Laser (LIL) est le prototype à l'échelle 1 d'une chaîne du LMJ ; elle est constituée de 8 faisceaux regroupés par paquets de 4. Pendant les campagnes de qualification, une puissance de 2 TW et une énergie de 9.5 kJ ont été obtenus sur un seul faisceau, et la tache focale d'un quadruplet sur cible a été complètement caractérisée[2].

### 2. LE SCHÉMA DE BASE DU LASER

Un faisceau du Laser Mégajoules (figures 1 et 2) est composé d'un grand nombre de composants [3] qui d'un point de vue fonctionnel peuvent être regroupés en trois sous-ensembles :

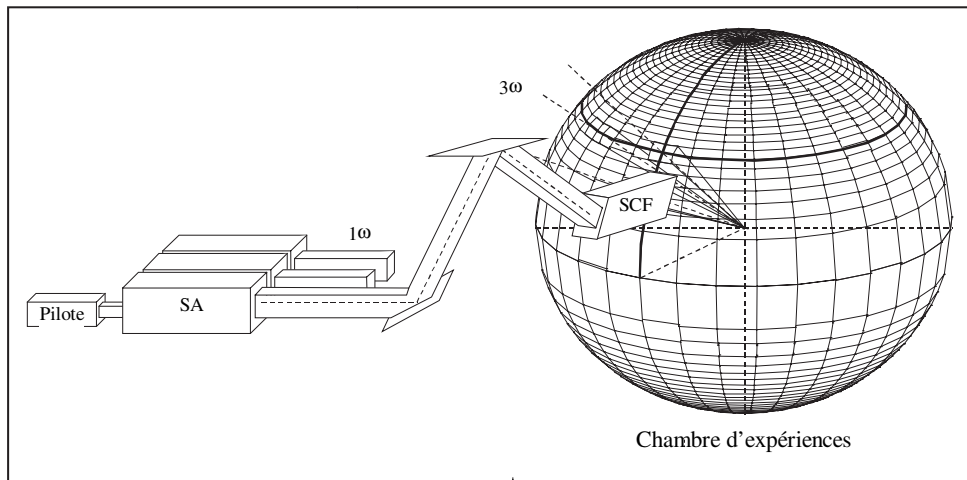
- le pilote (en temps que source au sens large) qui délivre à faible énergie (1J maximum par faisceau), la forme temporelle, spatiale et spectrale de l'impulsion laser,
- la section amplificatrice (SA), caractérisée par son gain élevé qui amplifie l'impulsion issue du pilote jusqu'à une vingtaine de kilojoules,
- la fin de chaîne qui comprend d'une part le système de conversion de fréquence (passage de 1 à 2 puis 3 $\omega$ ) et de focalisation (SCF) et le nez de chambre (NdC) qui est l'interface avec la chambre d'expérience.

Deux grands principes rentrent en jeu pour générer la tache focale :

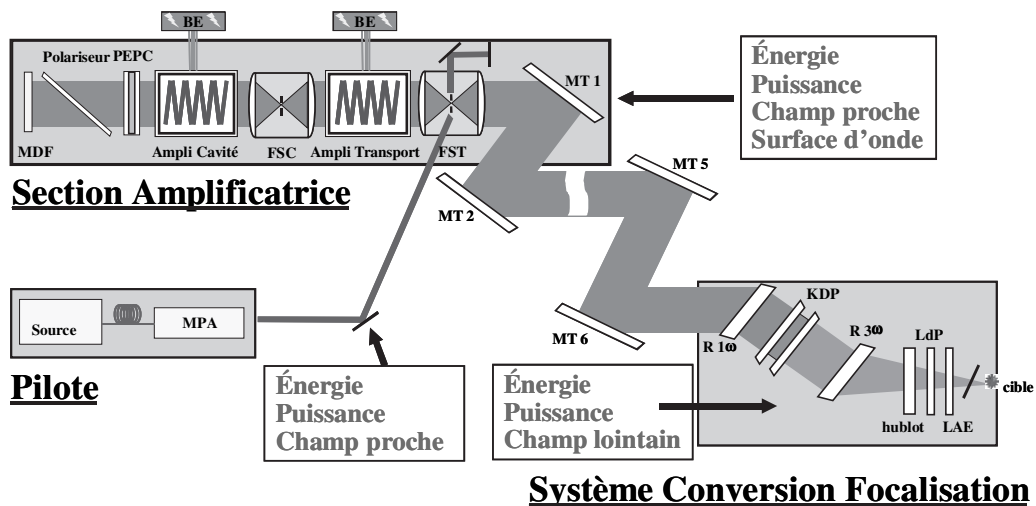
- générer la tache focale en champ lointain à partir d'une répartition en champ proche maîtrisée,
- déplacer très rapidement cette tache pour « brouiller » la répartition en champ lointain et la rendre la plus homogène possible sur un espace de temps donné. Cette fonction est appelée « lissage » (« beam smoothing » en anglais).

Du point de vue de la propagation du faisceau depuis la source du pilote jusqu'à la cible, on dénombre les fonctionnalités suivantes :

- dans le pilote, un dispositif de mise en forme spatiale MFS, deux dispositifs d'élargissement spectral (le modulateur de phase appelé modulateur « Brillouin » et le modulateur de phase pour la fonction lissage),
- dans la Section Amplificatrice (SA), un miroir déformable [4] et des trous de filtrage spatiaux,
- dans le Système de Conversion de Fréquence et de focalisation (SCF), deux réseaux de diffraction dont un réseau plan à 1 $\omega$  et un réseau focalisant à 3 $\omega$ .
- dans le Nez de Chambre (NdC), une lame de phase calculée pour mettre en forme la tache focale selon le besoin spécifié.



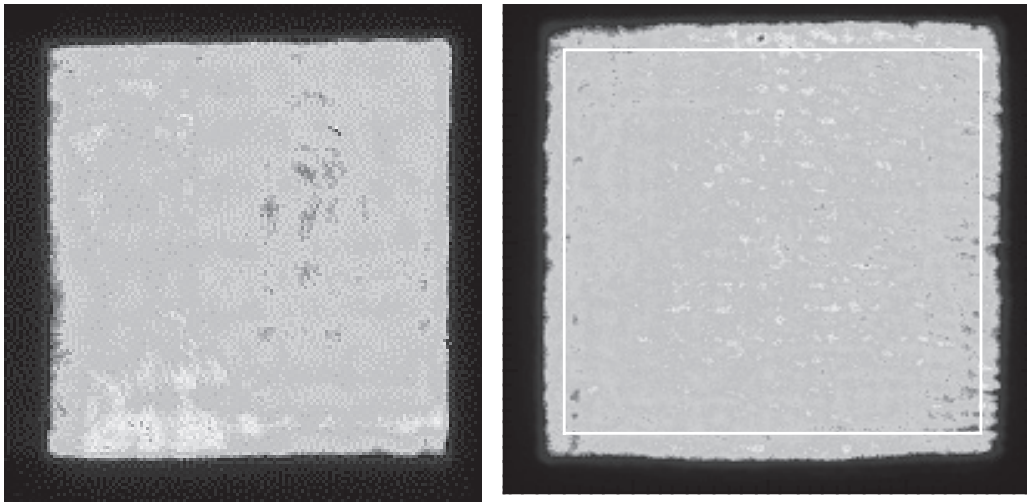
**Figure 1.** Parcours du faisceau laser depuis le pilote, au travers de la SA, dans le transport schématisé par deux miroirs (6 pour LMJ) et jusqu'au SCF qui le focalise au centre de la chambre d'expérience.



**Figure 2.** Schéma de principe d'un faisceau du Laser Mégajoules avec les principales mesures au niveau des diagnostics lasers.

### 3. LE FAISCEAU EN CHAMP PROCHE

Le faisceau laser est mis en forme au niveau du pilote [5, 6] (forme, dimensions et répartition d'amplitude). La forme est imposée par une cavité à transformée de Fourier. Cette cavité détermine la forme carrée du mode amplifié selon le principe suivant : sachant qu'une lentille réalise la transformée de Fourier d'un plan objet dans un plan image, et que la forme carrée souhaitée dans le plan image correspond à un sinus cardinal dans le plan objet, il suffit de placer dans ce dernier plan un miroir à profil de réflectivité théorique en forme de sinus cardinal. Dans la technologie retenue par l'industriel, ce sinus est réalisé de manière approximative par une grille gravée sur le miroir de fond de cavité. Les traits de la grille sont placés sur les zéros du sinus cardinal. Cette répartition est mise en forme par un dispositif de type actif. Il permet de définir point par point, et de manière informatique, la répartition d'intensité



**Figure 3.** Champ proche caractéristique en sortie de pilote (37 mm) à gauche et en sortie de section amplificatrice (37 cm) à droite.

dans toute la section du champ proche carré. Le principe consiste à adresser de manière optique une valve à cristaux liquides se comportant comme une matrice de transmission programmable point par point. La sortie du pilote est en outre munie d'un système optique afocal à grandissement variable qui permet d'adapter la taille du faisceau en sortie de pilote ( $< 10 \times 10 \text{ mm}^2$ ) à la dimension nécessaire pour extraire l'énergie dans la section amplificatrice avec un grandissement moyen de 40 ( $37 \times 37 \text{ mm}^2$  au niveau de la pupille d'entrée de la section amplificatrice qui se transforme en  $37 \times 37 \text{ cm}^2$  dans les tronçons amplificateurs, le transport et jusqu'aux cristaux de KDP).

Dans la section amplificatrice, les plans images sont : la pupille d'entrée, le miroir déformable MDF, le miroir M2 pour le champ proche. Les trous de filtrage spatiaux pour le champ lointain. En sortie de section amplificatrice, le faisceau se propage librement jusqu'au SCF sur une distance maximum de 47 mètres en se réfléchissant sur 6 miroirs de transport.

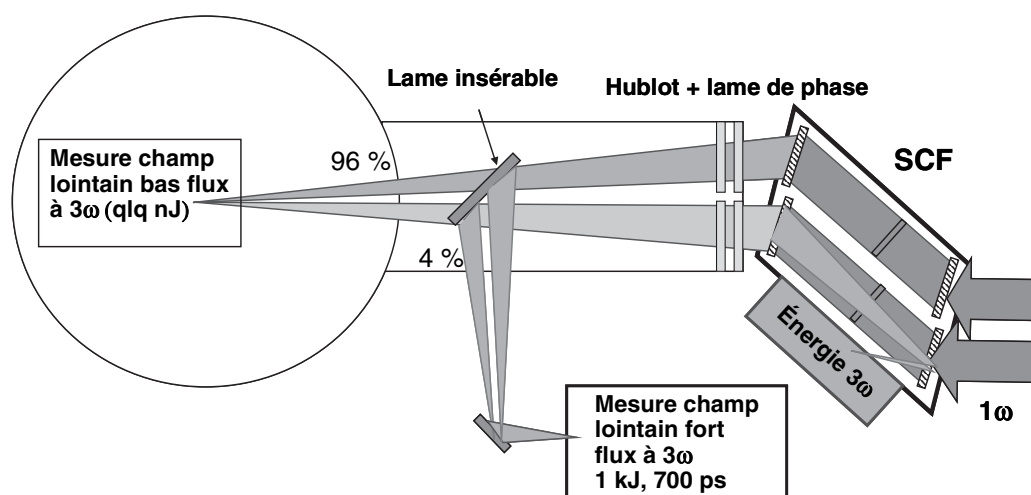
#### 4. LE FAISCEAU EN CHAMP LOINTAIN

Le concept de fin de chaîne répond à un certain nombre de fonctions : la conversion de fréquence (transformer 1 en 2 puis  $3\omega$ ), la séparation des harmoniques (n'apporter que  $3\omega$  sur cible), la focalisation pour concentrer l'énergie, l'interface extérieur / vide de la chambre et la mise en forme spatiale (pour façonner la répartition d'intensité dans la tache focale).

Le choix de concept du SCF-NdC s'est porté sur les solutions suivantes : réseau de diffraction pour séparer les harmoniques et pour focaliser à  $3\omega$ , lame de phase pour la mise en forme spatiale. La mise en forme de la tache focale est assurée par un sous-ensemble comprenant les cristaux de conversion de fréquence en sandwich entre deux réseaux dont un assure la focalisation au centre chambre et une lame de phase calculée pour imposer la répartition spatiale en champ lointain et participer au lissage de la tache focale grâce aux modulateurs de phase situés en amont de la chaîne de puissance dans le pilote [5, 6].

Du point de vue optique, le réseau de diffraction à  $3\omega$  est l'équivalent d'une lentille simple de 8 mètres de distance focale.

La figure 4 page suivante est un schéma de principe de l'ensemble SCF-NdC tel que mis en œuvre pour le premier quadruplet de la LIL, prototype du quadruplet LMJ. On y distingue les différents composants du SCF et du Nez de Chambre. Suivant le sens de propagation du faisceau : réseau  $1\omega$ , KDP



**Figure 4.** L'ensemble SCF-NdC. L'ensemble est conçu, monté et aligné pour un quadruplet (quatre faisceaux). Les quatre taches focales sont théoriquement superposées au centre chambre. Sur la chambre d'expériences de la LIL d'un diamètre de 4 m, le Nez de Chambre est suffisamment long pour abriter une lame insérable qui permet de mesurer la tache focale dans les conditions nominales de fonctionnement.

doubleur et tripleur, réseau  $3\omega$ , hublot de chambre, lame de phase, lame anti-éclat, lame de prélèvement insérable.

Étant donné le grand nombre de composants vus par le faisceau depuis la mise en forme dans le pilote, la phase de l'onde laser (le front d'onde) accumule des aberrations qui ont été filtrées par :

- la correction de surface d'onde pour les grandes périodes spatiales ( $p > 10$  mm),
- les filtrages spatiaux ( $p < 10$  mm).

Puisqu'il n'y a pas de filtrage spatial entre la fin de la section amplificatrice (filtrage spatial de transport) et la tache focale, on retrouve dans la tache focale toutes les périodes  $> 10$  mm (donc les fréquences spatiales  $< 100 \mu\text{rad}$ ). Ainsi, au premier ordre le rayon de la tache focale est de l'ordre de  $r = 8 \text{ m} \times 100 \mu\text{rad} = 0,8 \text{ mm}$ .

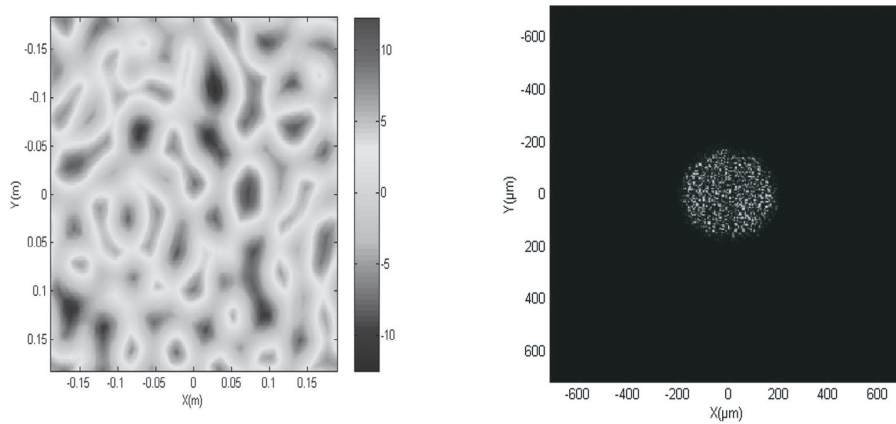
## 5. RÔLE DE LA LAME DE PHASE

La spécification de besoin du maître d'ouvrage impose une tache focale de répartition en intensité la plus super gaussienne possible. Pour répondre à ce besoin, on calcule le profil de phase nécessaire pour obtenir la répartition imposée au niveau de la tache focale. Le principe de ce calcul [7, 8, 9] est utilisé au CESTA dans l'environnement du code MIRO. Pour simplifier, le calcul revient à effectuer un calcul de diffraction inverse et on impose un profil de phase continu afin d'éviter les sauts de phase des premières lames kinoformes. Un exemple de calcul pour tache circulaire super gaussienne est donné figure 5.

Une fois calculée, la lame est réalisée par usinage ionique à partir d'un masque enregistré dans une résine photosensible. Pour le premier quadruplet de la LIL, on a fait réaliser 5 lames de phase « identiques » par la société Jobin-Yvon.

## 6. LE LISSAGE OPTIQUE SUR LA LIL

A ce stade, on pourrait se contenter de la tache focale telle que représentée figure 5. Son profil moyen correspond au besoin. Mais son profil réel est en fait très perturbé car il contient des figures de tavelure



**Figure 5.** A gauche, profil de lame de phase calculée pour tache focale circulaire super gaussienne d'ordre 8 et de  $600 \mu\text{m}$  de diamètre à 1% de  $I/I_0$ . A droite, la tache focale de la lame seule (réponse percussive) obtenue avec la lame calculée.

(speckle) qui sont caractéristiques de l'aspect cohérent du rayonnement laser. La tache focale aberrante et hautement inhomogène des lasers de puissance est d'abord redistribuée sur un ensemble de petites taches (tavelures). La dimension d'un grain de speckle est environ de  $2f\lambda/D$  soit  $16 \mu\text{m}$  à  $351 \text{ nm}$  pour un faisceau de  $37 \text{ cm}$ . Le résultat en est une répartition d'intensité plus homogène statistiquement et plus reproductible. La lame de phase, qui se place en fin de chaîne, possède le grand avantage d'autoriser la propagation dans la chaîne laser d'une onde quasi plane sans modulation spatiale d'intensité.

La technique de lissage est détaillée dans de nombreux documents [11, 12, 13, 14]. La technique de lissage mise en œuvre sur la LIL et le LMJ est le lissage SSD (Smoothing by Spectral Dispersion). Cette méthode a été imaginée au LLE (Laboratory for Laser Energetics, Université de Rochester, Etats-Unis), puis reprise au LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory, Etats-Unis) ainsi qu'au CEA.

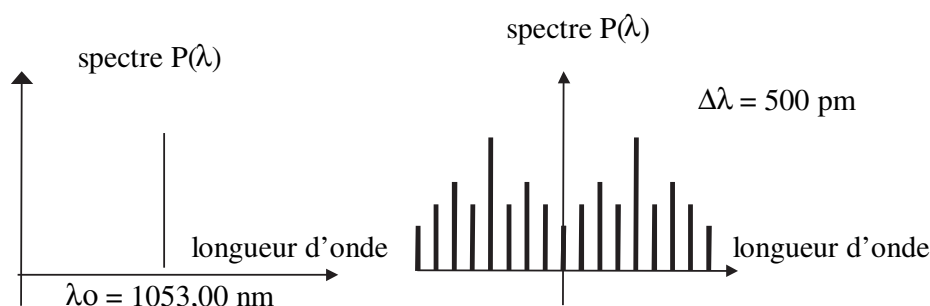
Pour simplifier, on met en œuvre une technique telle que les figures de tavelures se déplacent à une vitesse suffisamment grande pour contrôler les instabilités paramétriques lors de l'interaction du rayonnement laser avec le plasma créé sur cible. On dit que le lissage « va faire bouger les points chauds du faisceau ». Les notions de temps de cohérence, vitesse des points chauds et temps de vie des grains sont explicitées et justifiées dans les références [14].

Il repose sur deux principes : créer un spectre large fonction du temps, disperser ce spectre avec un élément diffractif pour transformer la fonction temporelle en fonction spatiale.

Si on alimente le laser avec une lumière poly chromatique, les grains de tavelures suivent chacun indépendamment des autres les fluctuations du laser et « clignotent » mais ne se déplacent pas. L'intégration en temps possède donc la même structure spatiale que la figure instantanée, car il n'y a pas eu de couplage entre l'incohérence temporelle (spectre large) et la distribution spatiale transverse. Ce couplage est réalisé si on rajoute au dispositif « lame de phase + laser poly chromatique », un disperser comme un réseau. Chaque longueur d'onde du spectre va produire des tavelures décalées spatialement et induire le lissage désiré.

## 7. CRÉER UN SPECTRE LARGE

Le laser doit présenter dans le temps des variations avec un temps caractéristique  $t_c$  beaucoup plus petit que la durée de l'interaction. Ceci implique l'utilisation d'un laser à spectre large, car la largeur spectrale du faisceau laser est donnée par l'inverse de ce temps  $t_c$  :  $\Delta\nu = 1/t_c$ .



**Figure 6.** La modulation de phase à la source permet de créer un spectre large borné constitué de raies. La largeur totale du spectre est égale à  $(2m + 1)f$  où  $f$  est la fréquence de modulation (14 GHz) et  $m$  la profondeur de modulation ( $0 < m < 10$ , typiquement  $m = 5$ ).

Bien que la nature de la largeur spectrale ne soit pas spécifiée pour réaliser le lissage, on préfère utiliser une modulation de fréquence plutôt qu'une modulation d'amplitude qui est néfaste lors de la propagation dans la chaîne. Pour faciliter le langage, on associe la notion de spectre large à celle d'incohérence temporelle, bien que cette dernière ne soit pas une nécessité pour effectuer un lissage du faisceau laser, le lissage résultant simplement d'un codage spatial et spectral du faisceau. On fabrique la fonction  $\lambda = f(t)$  par modulation de phase sinusoïdale à la source (modulateurs électro-optiques de quelques GHz).

## 8. DÉPLACER LA FIGURE DE TAVELURES AVEC UN RÉSEAU DE DIFFRACTION

Un disperseur échantillonne le faisceau en sous-pupilles élémentaires, et leur fait subir un retard temporel supérieur au temps de cohérence  $t_c$ . Il apparaît ainsi un nouveau temps caractéristique, le retard total  $T_{ret}$  induit par le disperseur sur la totalité de la pupille. Le nombre de figures de tavelures additionnées de façon statistiquement indépendante est alors donné par le rapport  $N = T_{ret}/t_c$ , et le contraste de la distribution intégrée est ainsi diminué comme  $C = N^{1/2}$ . Ce processus revient à induire de l'incohérence spatiale à partir de l'incohérence temporelle [12].

La fonction  $\theta = g(\lambda)$  est facile à obtenir avec un réseau de diffraction.

On obtient dans la tache focale sur cible un mouvement  $\theta = g(\lambda) = g[f(t)]$ .

Le point qui reste critique pour un faisceau incohérent est la conversion de fréquence à  $3\omega$  qui est très exigeante en pureté spectrale, aussi bien temporelle que spatiale. Si bien que cette conversion chute quand le spectre dépasse  $0.3 \text{ nm}$  à  $1\omega$ . Cette largeur spectrale limite le temps de cohérence du laser à quelques 10 ps. Dans le cas particulier du schéma de base LMJ, les réseaux de fin de chaîne jouent un rôle particulier.

En effet, si les réseaux focalisant sont préférés aux lentilles, c'est pour déporter l'axe des cristaux de KDP convertisseurs du flux de neutrons provenant de la cible implorée. Ils permettent aussi une bonne séparation des longueurs d'onde non converties.

Mais, par ailleurs, les réseaux focalisant fournissent également une dispersion axiale qui conserve la symétrie circulaire de la tache focale. C'est pourquoi on parle de lissage longitudinal.

Le réseau focalisant est fortement chromatique : il conduit à une séparation longitudinale des grains en fonction de la fréquence.

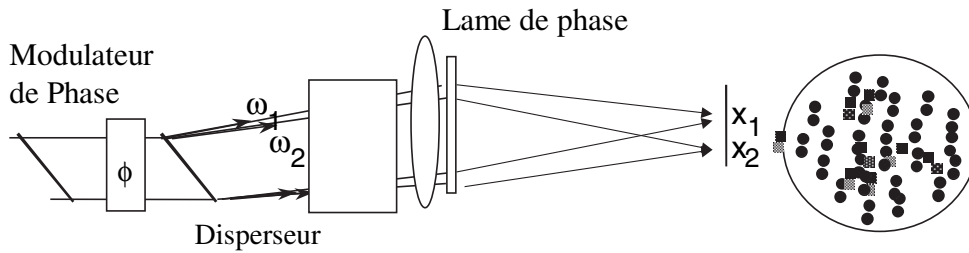


Figure 7. Principe du lissage avec spectre large et dispersion spectrale.

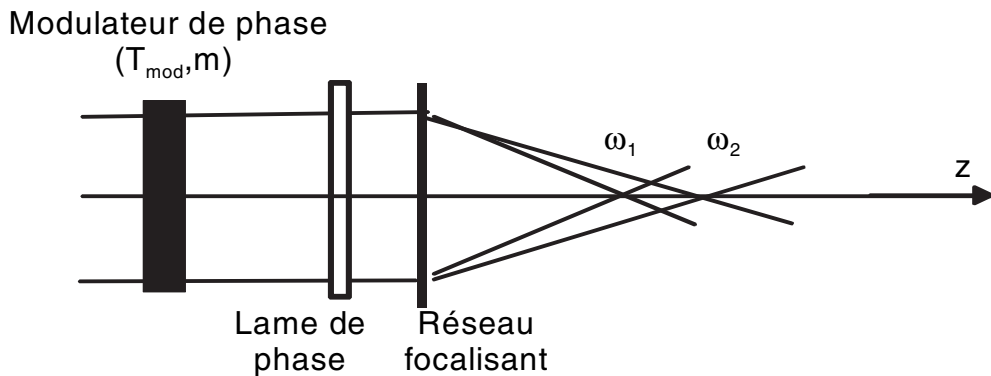


Figure 8. Lissage par Dispersion Spectrale Longitudinale (LSD) ou SSD longitudinal. Le réseau focalisant est fortement chromatique et induit une séparation longitudinale des grains en fonction de la fréquence. Pour séparer chaque fréquence d'au moins un grain, il faut  $T_r > T_{mod}$ .

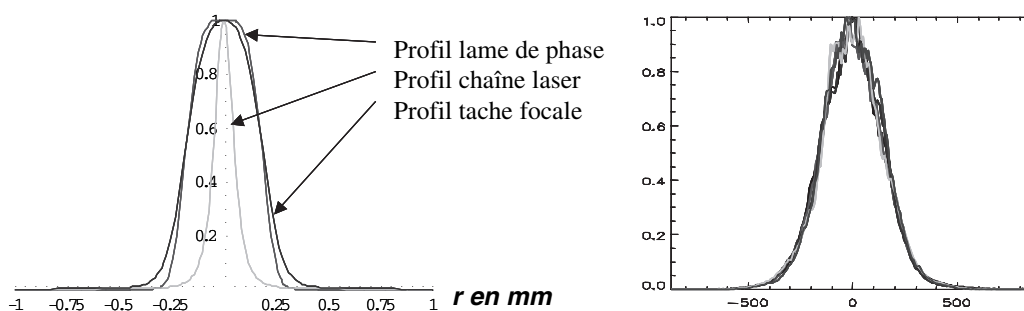
## 9. DIMENSIONS DE LA TACHE FOCALE

L'ensemble des techniques de lissage présentées vont modifier la répartition de la tache focale. La tache focale telle que mesurée sur le premier quadruplet de la LIL, sera le résultat des différents contributeurs (figure 9) :

- réponse percussionnelle de la chaîne (aberrations des composants) avec mise en œuvre du système de correction de surface d'onde. Pour représenter au mieux la réponse percussionnelle en intensité de la chaîne, nous proposons de prendre une lorentzienne (au carré) dont la largeur sera de  $350 \mu\text{m}$  à 3% du sommet.
- réponse percussionnelle de la lame de phase. Les lames calculées pour la LIL ont des réponses théoriquement super gaussienne en intensité (ordre 8 et rayon de  $240 \mu\text{m}$ ), mais on constate une dispersion de l'ordre de  $40 \mu\text{m}$  sur les réponses des différentes lames réalisées.
- superposition des quatre taches « faisceaux ». Cette superposition est délicate et la forme finale de la tache sera entachée d'une erreur de pointé liée au temps nécessaire pour passer de la fin de la séquence d'alignement au tir de puissance. Actuellement, l'erreur de pointé a été mesurée à  $20 \mu\text{m rms}$ .
- mouvements des figures de tavelure dus au lissage. Cet aspect n'est pas encore complètement quantifié. On sait qu'il est faible, de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ .

A partir des résultats présentés sur la figure 9, on peut tirer des renseignements sur la façon de concevoir la lame de phase pour obtenir une tache de dimensions données.

Si on calcule une lame de phase dont la réponse percussionnelle est la plus petite possible, on obtient une tache focale de dimensions équivalentes mais dont les flancs sont très mous : c'est la réponse de



**Figure 9.** Les différents contributeurs de la tache focale sont indiqués sur la partie gauche de la figure. Par rapport au profil idéal calculé pour la lame de phase, la contribution des aberrations de la chaîne et le lissage vont étaler spatialement la tache en amollissant ses flancs. A droite plusieurs enregistrements superposés de la tache focale du quadruplet de la LIL (5 tirs effectués entre 2,5 et 4,8 kJ en 700 ps et 5 ns).

la chaîne laser qui impose ses caractéristiques à la tache finale. Ceci se comprend lorsque l'on sait que ce sont les hautes fréquences spatiales générées par les composants optiques et amplifiées par les effets non linéaires (le B) qui contribuent le plus à l'effet d'étalement de la tache focale.

Si on calcule une lame de phase dont la réponse percussive est plus grande, on va « noyer » la réponse de la chaîne dans la réponse de la lame. Ainsi en prenant une lame de phase volontairement plus grande, on obtiendra une tache finale plus grande mais dont les flancs seront beaucoup plus raides (sans jamais être aussi raides que ceux de la réponse de la lame).

Ce phénomène est parfaitement visible sur la tache focale de la LIL. Si on part d'une réponse de lame de phase en super gaussienne d'ordre 8, on obtient une tache finale plus large et quasi gaussienne. Cet exemple est tout à fait représentatif d'une tache focale circulaire telle que mise en œuvre sur la LIL.

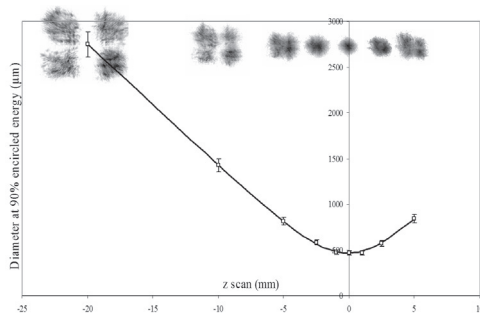
## 10. MÉTROLOGIE DE LA TACHE FOCALE

Pour caractériser la tache focale obtenue, on a conçu deux types de diagnostics : le premier directement au centre chambre qui intercepte le faisceau à bas flux a permis d'enregistrer l'évolution du quadruplet autour du meilleur foyer et le second fonctionnant à fort flux (1 kJ) qui prélève une partie du faisceau à 351 nm [15, 16]. Dans les deux cas, le profil spatial est intégré sur toute la durée de l'impulsion laser.

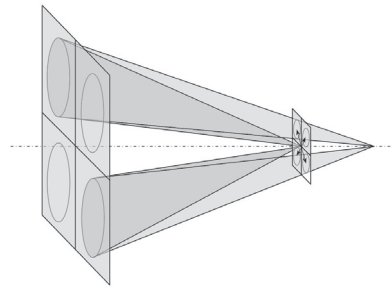
## 11. DIAGNOSTIC BAS FLUX AU CENTRE CHAMBRE

Il s'agit d'une caméra CCD Sony XCD-SX900 fonctionnant dans le domaine UV et dont la taille de pixel est de  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ . Positionnée au centre chambre sur le porte-cible, elle est munie d'un objectif de grandissement 3 et d'un filtre UV pour éliminer le bruit de fond ambiant. Pour ce faire, on n'utilise que l'énergie du pilote (1 J maximum en régime ns) sans pomper les amplificateurs de puissance. En fin de chaîne, le rendement de conversion de fréquence est suffisamment faible pour que la caméra soit en vision directe du faisceau : elle ne supporte que quelques centaines de pJ à quelques nJ. Grâce au déplacement du SCF, on peut explorer la zone de focalisation du quadruplet autour du meilleur foyer avec une cadence de tir toutes les 10 mn. Ce dispositif permet de régler et de contrôler la superposition des quatre faisceaux au meilleur foyer et de mettre facilement en évidence la structure du quadruplet dès que l'on sort de la zone de Rayleigh comme le montre la figure 10. Avec l'objectif de grandissement 3, on obtient une résolution spatiale de  $1,6 \mu\text{m}$  qui permet de « voir » les effets du lissage dans la tache mono faisceau comme dans la tache quadruplet (figure 13).

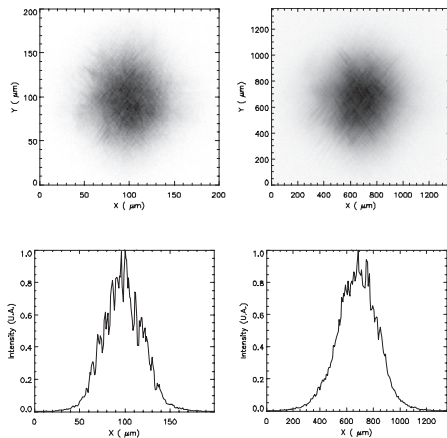




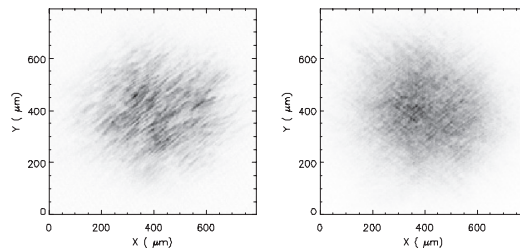
**Figure 10.** Évolution de la tache focale du quadruplet (sans lame de phase) autour du meilleur foyer.



**Figure 11.** Chromatisme introduit par la géométrie des réseaux d'un quadruplet.



**Figure 12.** Effet de la modulation de phase à 1 kJ, 5 ns. A gauche, tache focale sans et à droite avec une largeur spectrale de 140 GHz.



**Figure 13.** Taches focales avec une largeur spectrale de 28 GHz. L'orientation à 45° des figures de tavelure est caractéristique du lissage sur un faisceau. A droite superposition des 4 faisceaux.

## 12. DIAGNOSTIC HAUT FLUX SUR VOIE ANNEXE

Ce second diagnostic est installé sur une table de métrologie sous la chambre d'expériences de la LIL. Une lame de prélèvement en silice de  $910 \times 580 \text{ mm}^2$  et d'épaisseur 90 mm est insérée dans le faisceau UV au niveau du Nez de Chambre et renvoie 4% du faisceau incident à angle droit. On obtient donc un second champ lointain identique à celui délivré au centre chambre sur la cible. A cause de la position de la lame de prélèvement dans la partie focalisée du faisceau, les tirs sont limités en énergie par faisceau au niveau du kJ en 700 ps ou la centaine de Joules en 5 ns. Cela a permis d'enregistrer 5 tirs effectués entre 2,5 et 4,8 kJ en 700 ps et 5 ns. La CCD utilisée est une Quantix refroidie avec une dimension de pixel de  $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$ . Dans les conditions d'utilisation, la résolution spatiale est de  $10 \mu\text{m}$ .

## 13. COMPARAISON DES MESURES ET DES CALCULS

Les mesures avec les différents diagnostics présentés montrent qu'avec lame de phase et lissage, la dimension à 3% du maximum du quadruplet au meilleur foyer est de 750 à 850  $\mu\text{m}$  avec une précision

de mesure de  $\pm 30 \mu\text{m}$  à  $\pm 40 \mu\text{m}$ . Cet écart dans les mesures est du à la qualité de la superposition des quatre faisceaux ainsi qu'à la différence de résolution spatiale entre le diagnostic bas flux et le diagnostic haut flux. Globalement, le diagnostic bas flux donne des valeurs proches de  $750 \mu\text{m}$ , tandis que le diagnostic haut flux donne des valeurs proches de  $850 \mu\text{m}$ .

Les calculs montrent que la dimension de la tache focale serait plutôt de  $750 \mu\text{m}$  à 3% du sommet et que sa forme se rapproche d'une super gaussienne d'ordre 2,2.

#### 14. CONCLUSION

Ce document présente l'ensemble des composants et des fonctions mis en œuvre dans le schéma de base du sous-système laser LMJ pour obtenir une tache focale maîtrisée. La stratégie de mise en forme de la tache focale repose d'une part sur le concept de focalisation issu du schéma de base du sous-système laser (Système de Conversion de fréquence et de Focalisation à réseaux et Nez de Chambre à lame de phase) et d'autre part sur le concept de lissage optique mis en œuvre (lissage par dispersion spectrale).

Compte tenu de la difficulté de mise en œuvre d'une métrologie spatiale en champ lointain sur une installation aussi complexe, les profils de tache focale enregistrés sont d'une grande qualité. La dimension à 3% du maximum du quadruplet au meilleur foyer est de  $750$  à  $850 \mu\text{m}$  avec une précision de mesure de  $\pm 30 \mu\text{m}$  à  $\pm 40 \mu\text{m}$ . Des expériences sont en cours pour approfondir notre compréhension des techniques de lissage sur ce type de laser.

#### Références

- [1] M. L. André, "Status of the LMJ project", in Solid state lasers for application to Inertial Confinement Fusion: Second Annual International Conference, M. L. André, ed., Proc. SPIE **3047**, 38-42 (1997).
- [2] JM. Di-Nicola et al., "The LIL facility start-up", in proceedings of IFSA2003, pp. 558-562 et "The LIL Facility Quadruplet Commissioning", in proceedings of IFSA2005.
- [3] B. Le Garrec : « Le schéma de base du laser Mégajoule », Chocs n°29, pp 18- 23, avril 2004.
- [4] B. Le Garrec : « Correction de surface d'onde dans les lasers de puissance », Chocs n°27, pp 17-24, juin 2003.
- [5] A. Jolly, J.F. Gleyze, J. Luce, H. Coic, G. Deschaseaux: « Front-end sources of the LIL-LMJ fusion lasers : progress report and prospects », Opt. Eng. 42(5) 1427-1438 (2003).
- [6] A. Jolly, J. Luce, J.F. Gleyze, H. Coic, G. Deschaseaux: « L'injection du faisceau : le pilote », Chocs n°29, pp 32- 40, avril 2004.
- [7] R.W. Gerchberg, W.O. Saxton: « A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures », Optik, vol **35**, N°2, pp 237-246 (1972).
- [8] Y. Lin, T.J. Kessler, G.N. Lawrence: "Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance", Optics Letters, vol **21**, n°20, p1703-1705(1996).
- [9] S. N. Dixit, M. C. Rushford, I. M. Thomas and M. D. Perry: « Continuous contour phase plates for tailoring the focal plane irradiance profile », in Solid state lasers for applications to ICF, SPIE vol. **2633**, pp. 141-151 (1995).
- [10] J. Néauport, B. Le Garrec, J. Flamand, Y. Jossierand, F. Bonnemaïson, G. de Villèle: « Optique diffractive et lasers de puissance : réseaux et lames de phase pour les lasers LIL et LMJ », Photoniques n°6, mai 2002, pp 27-31.
- [11] S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler, R. S. Craxton, S. Letzring and J. M. Soures : « Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light », Journal of Applied Physics, vol **66**, n°8, , p3456-3462 (1989).

- [12] "Beam smoothing by spectral dispersion (SSD)" LLE Review, vol **36**, p158-172 (1988).
- [13] J.E.Rothenberg : "Two dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct drive inertial confinement fusion", Solid State Lasers for Applications to ICF , Proc. SPIE, vol **2633**, p634-644 (1995).
- [14] L. Videau, Le lissage optique pour les chaînes laser de puissance, Thèse de Doctorat, présentée le 11/09/98 à l'Ecole Polytechnique.
- [15] A. Boscheron et al., "Laser Diagnostic Setup for The LIL Start-up and Qualification", in proceedings of IFSA 2001, p.863-866.
- [16] P.Arroyo, G.Behar, J-L.Dubois, V.Durand, C.Lahonde and M. Mangeant : "Characterization of LIL laser UV focal spot", in proceedings of IFSA2005.