Mesures de temps courts (femto-secondes) et alignement des lasers ultra intenses

présentation faite par :

Cristian FLOREA – Professeur titulaire à l'ESIEE, l'Université Paris Est Professeur Invité - Laboratoire d'Optique Appliquée ENSTA - Ecole Polytechnique Chemin de la Hunière / 91761 Palaiseau Cedex E-mail: "Cristin FLOREA"<cristian.florea@ensta.fr> http://loa.ensta.fr/ ; http://www.extreme-light-infrastructure.eu/



École Nationale Supérieure de Techniques Avancées

Membre de ParisTech

frontières

dépasser les [.]





équipes mixtes du LOA* et de l'ESIEE** :

Alexandre ADOLPHE**, Fatima ALAHYANE*, Frédéric BURGY*, Gilles CHERIAUX*, Lionel DEMECQUENEM**, Guy HAMONIAUX*, Thierry LEFROU*, Marc LOUZIR*, Mickaël MARTINEZ*, Louana MATTOS DE OLIVEIRA*, Jean-Luc POLLEUX**, Patrick SANGOUARD** Coordonnées par :

André ANTONETTI, Cristian FLOREA, et Gérard MOUROU

$$le paramètre a_0$$

$$a_0 = \frac{p_0}{m_0 \cdot c} = \frac{e \cdot E}{m_0 \cdot \omega_0 \cdot c} = \frac{e \cdot E \cdot \lambda_0}{2\pi \cdot m_0 \cdot c^2}$$

$$= 0.85 \times 10^{-9} \cdot \sqrt{I(W/_{cm^2}) \cdot \lambda_0(\mu m)}$$

où *E* est l'amplitude du champ électrique du laser et λ_o est la longueur d'onde centrale du laser.

Pour des valeurs $a_0 \le 1$, on reste dans le régime classique, et pour des valeurs $a_0 >> 1$, on entre pleinement dans le régime relativiste.

LASER ®Évolutions...



© C.F. _ LOA 2008

4

Les références du passé en France et aux USA

Laser Mégajoule (LMJ, Bordeaux, France) National Ignition Facility (NIF, USA)

Objectifs:

- Simulation des armes nucléaires
- Étude de la fusion par confinement inertiel
- (combustion du Deuterium-Tritium avec un gain de 10)
 - Énergie : 1,8 MJ
 - Durée effective : 3-5 ns
 - Longueur d'onde : domaine de l'ultra-violet (UV)
 - Uniformité : de l'ordre de 1% sur le µ-ballon

Solution retenue :

- laser solide (Verre dopé Nd³⁺, à 1,053 μm) pompé par lampes et conversion de fréquence (3ω)
- 240 faisceaux de 40 cm par 40 cm
- Volume de verre dopé Néodyme : 27 m³
- Surface des faisceaux : 37,5 m²



LASER NOVA DU LLNL (1984, Lawrence Livermore National Laboratory) 36 kJ (UV) en 10 faisceaux

02/11/08

Sphère d'interaction NOVA

= 10 faisceaux



• USA

02/11/08

Architecture « ancienne »



Les chaînes sans CPA en France et aux USA

- les chaînes de haute énergie du type :
 - NIF (National Ignition Facility) aux Etats-Unis (1 MJ et 1 PW)
 - le laser Mégajoule à Bordeaux (1.8 MJ et 500 TW)
 ont des énergies supérieures au kJ, avec des durées d'impulsions relativement longues (ns)
- La CPA n'y est pas utilisée !
- Ils utilisent comme matériau amplificateur du verre dopé à l'ion Néodyme, qui peut être fabriqué en grandes dimensions.
- Les inconvénients de ce type de sources laser sont leur taux de répétition qui est très faible (1 tir toutes les heures ou toutes les 20 minutes au mieux), leur taille et leur coût.

Schéma « CPA »

Amplification par dérive de fréquence (CPA chirped pulse amplification)



Première CPA (Mourou & Strickland)

- Chirped Pulse Amplification (CPA) = amplification à dérive de fréquence [Mourou and Strickland, 1985] : "Compression of amplified chirped optical pulses", Optics Communications, 56 p. 219-221(1985).
- Mourou et Strickland ont proposé une technique d'amplification à dérive de fréquence, ainsi que sa réalisation expérimentale. Une impulsion, issue d'un laser Nd :YAG de durée 150 ps, est étirée dans une fibre jusqu'à 300 ps, puis amplifiée dans un amplificateur régénératif Nd :Verre. La compression, réalisée par une paire de réseaux, permet d'obtenir une impulsion de 1,5 ps avec une énergie de 1 mJ.

LASER LOA qui utilisent la CPA



LASERS LOA et CEA qui utilisent la CPA

- LASER dont les impulsions ont une énergie plus modeste, de l'ordre du joule, mais une durée très courte. Le matériau amplificateur le plus utilisé est le titane-saphir, qui permet des durées de l'ordre de quelques femto-secondes.
- Ces sources sont souvent qualifiées de (<table-top>) lasers, car un de leur avantage est leur compacité, une chaîne complète pouvant être contenue dans une pièce de 100 m².
- Un autre grand avantage de ces sources est le taux de répétition qui peut aller jusqu'au kHz. Un fort taux de répétition est un atout important pour les perspectives d'applications.

① Schéma d'un oscillateur femto



Oscillateurs femto commerciaux

140 fs, 0.72 - 0.93 µm



http://www.coherentinc.com/

12 fs, 800 nm



http://www.femtolasers.com/



http://www.spectraphysics.com/

100 fs, 0.7 – 1.0 µm



http://www.menlosystems.com/

11/02/08

Blocs 2 et 4 :

Etirement et compression d'impulsions

- L'étireur va faire suivre aux différentes longueurs d'onde composant le spectre de l'impulsion des chemins optiques différents, afin que les plus grandes longueurs d'onde réalisent un chemin plus important dans l'étireur que les courtes longueurs d'onde.
- Le compresseur réalise une opération inverse.

Étireur & Compresseur



Bloc ③: Amplification d'impulsion

 Après son étirement, l'impulsion doit être amplifiée en partant d'une énergie de l'ordre du nJ jusqu'à des valeurs de l'ordre du Joule, soit un gain global en énergie de l'ordre de 10⁹.

Amplification d'impulsion

 Pour réaliser ceci, l'énergie est stockée dans des matériaux amplificateurs au moyen d'un pompage optique par des lasers impulsionnels nanoseconde qui réalisent une inversion de population dans le milieu.

Amplification d'impulsion

 L'énergie est simplement transférée sur l'impulsion à amplifier en effectuant de multiples passages dans le matériau amplificateur.

 Cette amplification ne peut se réaliser dans un cristal unique, car après plusieurs passages, l'énergie du faisceau amplifié est telle qu'il faut augmenter sa taille pour éviter les endommagements d'optiques qui interviennent lorsque la fluence augmente.

• Plusieurs étages d'amplification sont nécessaires.

• Pour un laser 100 TW (salle jaune du LOA), nous avons trois étages d'amplification multi-passage pour atteindre

une énergie finale de 3,5 joules.

 En plus de la nécessité d'adaptation des tailles du faisceau injecté, il est nécessaire de disposer de plusieurs étages d'amplification car le premier étage est un amplificateur à gain, alors que les suivants sont dénommés amplificateurs de puissance.

 Le premier amplificateur permet en effet d'extraire peu d'énergie du milieu amplificateur par rapport à l'énergie de pompe apportée mais d'obtenir un bon gain en énergie sur l'impulsion injectée (environ 10⁶).

 Les amplificateurs de puissance suivante permettent d'extraire une fraction significative de l'énergie de pompe apportée, mais avec des gains plus faibles (10 à 200).

LASER Titane – Saphir

Les transitions de l'ion titane Ti³⁺ dans la matrice de saphir Al₂o₃ sont bien décrites par un système à quatre niveaux (cf. figure ci-jointe). Le pompage est réalisé entre les niveaux o et 3, ce qui correspond à une large bande d'absorption allant de 400 nm à 600 nm. Dans notre cas, des lasers impulsionnels Nd :YAG à 532 nm sont utilisés.

Les relaxations entre les niveaux 3 et 2 ainsi que 1 et o se font par des processus non radiatifs très rapides car d'origine vibrationnelle (pour τ_{32} une valeur maximale de 3,5 ps a été mesurée : Gayen S. K., Wang W. B., Petricevic V., Yoo K. M. et Alfano R. R., "Picosecond excite and-probe absorption measurement of the intra-2EgE3/2-state vibrational relaxation time in Ti3+:Al2o3", Applied Physics Letters, 50 (21), p. 1494-1496 (1987) . Il s'agit d'une étude des relaxations non radiatives dans le Titane saphir et plus particulièrement de la relaxation vibrationnelle dans la bande $2E_gE_{3/2}$ qui constitue les niveaux hauts de la transition de pompage et de la transition laser. Le temps de vie de relaxation vibrationnelle dans cette bande est trouvé à la valeur de 3,5 ps. C'est une limite maximale pour cette valeur. La transition laser a lieu entre les niveaux 2 et 1, avec un temps de fluorescence du niveau 2 égal à 3,2 ps à température ambiante.



02/11/08

Titane – Saphir & verre – néodyme

Le Saphir dopé au Titane, Ti :Sa $(Ti^{3^+}:Al_2O_3)$, est un bon candidat, utilisé pour produire des impulsions très énergétiques et très courtes. En effet, il possède une bande spectrale d'émission stimulée très large (650-1100 nm). La section efficace d'émission stimulée de ce matériau vaut 3×10^{-19} cm⁻² à 790 nm. Cette valeur confère au Ti :Sa une bonne capacité à extraire l'énergie stockée lors du pompage. De plus, sa conductivité thermique (35 WK⁻¹m⁻¹) permet une bonne évacuation de la chaleur. Les sources à Ti :Sa présentent ainsi le grand avantage d'un taux de répétition élevé, pouvant atteindre la dizaine de kilohertz.

D'autres chaînes utilisent comme milieu amplificateur un matériau amorphe (verre dopé au néodyme) qui peut être produit en grande dimension mais présente une bande spectrale de gain de quelques dizaines de nanomètres. Ce type de laser est donc adapté à la production d'impulsions moins brèves (quelques centaines de femtosecondes). Il présente un taux de répétition très faible (1 tir toutes les 20 minutes ou toutes les heures) en raison d'une faible dissipation de la chaleur dans le verre.

Corrélateur 3ω

• Équipe mixte : Alexandre ADOLPHE, Fatima ALAHYANE, Patrick SANGOUARD, Louana MATTOS DE OLIVEIRA, Guy HAMONIAUX, Thierry LEFROU, Marc LOUZIR, Mickaël MARTINEZ, Cristian FLOREA et Gérard MOUROU.

Profil temporel et spectre

Une impulsion brève exige une grande largeur spectrale



Caractérisation d'une impulsion brève : photo-détecteur + oscilloscope





Pour une impulsion ultrabrève, le signal est proportionnel à l'énergie de l'impulsion : $\int I(t)dt$

On mesure : > La réponse impulsionnelle du système de détection

- L'énergie par impulsion
- Le taux de répétition du laser

Mais on n'a pas accès à la durée de l'impulsion ...

Utilisation d'un interféromètre de Michelson : autocorrélation de 1^{er} ordre



$$s(\tau) = \int (E(t) + E(t - \tau))^2 dt$$

= Cste + 2 $\int E(t)E(t - \tau)dt$

Autocorrélation du champ



L'autocorrélation du champ (ou autocorrélation du premier ordre) fournit l'intensité spectrale mais ne donne aucune information sur la phase spectrale.

Ce n'est pas une mesure de durée.

Autocorrélation de 2^e ordre



$$P^{(2)}(t) = \chi^{(2)} E(t) E(t-\tau)$$

$$S(\tau) \propto \int_{-\infty}^{+\infty} \left| P^{(2)}(t) \right|^2 dt \propto \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) I(t-\tau) dt$$

Autocorrélation de l'intensité

Si la forme de l'impulsion est connue, on peut déterminer sa durée à partir de la largeur à mi-hauteur de la fonction d'autocorrélation de l'intensité.

Autocorrélation interférométrique de 2^e ordre



auto-corrélateur de 3^e ordre

• une mesure de contraste avec un auto-corrélateur de 3^e ordre permet de discriminer l'avant et l'arrière de l'impulsion et donc d'étudier les profils d'impulsions très dissymétriques.

mesure du profil temporel d'une impulsion femto-seconde

ASE (Amplified Spontaneaous Emission = émission spontanée amplifiée) provient de l'amplification de l'émission spontanée naturellement présente par les différents éléments réalisant le gain laser. L'ASE est un phénomène aléatoire, et est responsable du contraste dit « nanoseconde ».



On définit comme piédestal tout le contenu de l'impulsion en dehors de l'impulsion principale. Le contraste sera ici défini comme le rapport entre le niveau de signal du piédestal et de celui du pic de l'impulsion principale.

02/11/08

Conséquences d'un contraste temporel insuffisant

- Dans quelles conditions le piédestal va t'il jouer un rôle important dans les expériences ?
 - Avec un niveau de contraste nanoseconde de 10⁻⁶, si l'on considère des impulsions focalisées à des intensités supérieures ou égales à 10¹⁸ W/cm², le piédestal lui-même se retrouve à des intensités supérieures à 10¹² W/cm², suffisantes pour ioniser la plupart des cibles. C'était souvent le cas jusqu'en 2007.
 - Avec l'actuel niveau de contraste LOA de 10⁻⁹ 10⁻¹⁰ le piédestal se retrouve alors à des intensités de l'ordre de 10⁹ – 10⁸ W/cm²

Interaction d'une impulsion femto-seconde intense à mauvais contraste temporel avec une cible solide



il y a formation d'un pré-plasma, et l'impulsion principale interagit donc avec un plasma déjà partiellement détendu. Si on prend par exemple le cas des lasers Petawatt, ≥10¹⁵ W de puissance crête, qui sont actuellement en cours de développement, et en considérant des conditions de focalisation réalistes, des contrastes nanosecondes minimum de l'ordre de 10⁻¹⁰ sont exigés afin de pouvoir réaliser des expériences sur cibles solides sans création de pré-plasmas.

C'est le cas actuel dans les manips du « LOA »

Notre manip : L'autocorrélateur de 3^e ordre permettant la mise en évidence de façon précise du contraste d'une impulsion (à 10⁻¹⁰ près)



- Tout d'abord, le signal passe dans une première lames semi-réfléchissantes.
- Une petite partie du faisceau est dirigée vers une photodiode qui servira de référence pour normaliser le signal en bout de montage.
- Le faisceau passe ensuite dans une deuxième lame séparatrice, ce qui sépare le rayon en deux rayons lumineux cohérents : ① et ②.
- Chacun va suivre un chemin de distance optique différente.

- Le premier suit un chemin optique réglable manuellement pour qu'il corresponde à un décalage $\Delta x = 0$. Il passe également dans un cristal doubleur de fréquence. Ce cristal double la fréquence : 800 nm (ω) passe à 400 nm(2 ω).
- Le second faisceau passe par une ligne à retard Δ x qui crée une retard temporel et donc un déphasage entre les deux faisceaux. Un moteur en translation permet de contrôler
 ^{1/02/08} Cotto ligno à rotard

- Les deux faisceaux sont ensuite envoyés sur une lame semi réfléchissante particulière : elle a un T maximum et un R minimum pour la pulsation ω et un T minimum et un R maximum pour la pulsation 2ω.
- Les deux faisceaux se rejoignent et passent alors dans un cristal tripleur de fréquence, il se crée un faisceau 3

- On place ensuite un prisme (voir plusieurs prismes) au bout du montage pour séparer les trois faisceau et ne récupérer dans le photomultiplicateur que le signal d'impulsion 3 ω.
- On place aussi un atténuateur en entré de montage, car lorsque les deux faisceaux sont en phase l'intensité en sortie du cristal tripleur de fréquence est au cube, ce qui sature le photomultiplicateur ; pour éviter ce problème on place deux polariseurs au début du montage. Le premier est fixe et le second est piloté par un moteur en rotation.

11/02/08

L'autocorrélateur de 3^e ordre réalisé par l'équipe du LOA



~ 4 M

montage optique de l'auto-corrélateur 3ω du LOA

Principe de l'autocorrélation

- L'autocorrélation d'un laser consiste à faire varier
 « Δx » en relevant, pour chaque distance, les tensions du photomultiplicateur et de la photodiode (tension de référence).
- Les points de la courbe de corrélation ont les ordonnées égales aux rapports entre la tension du photomultiplicateur et le cube de la tension de la photodiode, c'est à dire la tension normalisée du photomultiplicateur.

Principe de l'autocorrélation

- Au départ, le montage est réglé pour que les deux faisceaux lasers soient en phase temporelle. A ce réglage correspond une distance « Δx » = 0.
- On augmente « Δx » au maximum, puis, pas à pas, on diminue « Δx ».
- Les faisceaux ne sont donc plus en phase temporelle, mais reste cohérent spatialement.
- Juste avant le passage dans la dernière lame semiréfléchissante, on peut représenter les faisceaux, pour chaque valeur de « Δ x », de la manière suivante :

Autocorrélation



Le chemin optique du premier faisceau est constant, il est défini par f(t). Ce faisceau a traversé un cristal doubleur, sont intensité (I1) est donc au carré. Par contre, le chemin du deuxième dépend de Δx , il est défini par f(t + τ) où $\tau = \Delta x/c$ et son intensité (I2) est la même que celle du départ, I. C'est pourquoi, la différence de phase entre les deux faisceaux diminue, puis ré augmente, en fonction de Δx .

11/02/08



courbe d'autocorrélation 3ω réalisée au LOA



Comparaison entre la mesure du contraste réalisée avec l'autocorrélateur de 3^e ordre avec et sans un miroir plasma



Alignement d'un laser ultra intense

• Équipe : Lionel DEMECQUENEM, Frédéric BURGY,

Gilles CHERIAUX, Fatima ALAHYANE, Jean-Luc

POLLEUX, Cristian FLOREA et André ANTONETTI

Schéma du manip



Mesure de l'alignement

- Si l'on considère le faisceau laser comme une droite de l'espace, la mesure de l'alignement du faisceau laser peut se traduire en deux mesures de position de points du faisceau.
- On dispose de deux capteurs de type cellule quatre cadrans pour le bloc d'acquisition : une telle cellule permet effectivement de localiser spatialement un point du faisceau.

Traitement de la mesure

- La partie de traitement suppose tout d'abord que l'utilisateur a défini une interface permettant, entre autres, d'enregistrer le voisinage dans lequel on souhaite maintenir notre faisceau laser: il fallait donc développer une interface permettant de tels choix.
- Les mesures :
 - il s'agit tout d'abord de les comparer aux deux positions désirées;
 - il faut donc une unité arithmétique et logique pour effectuer les calculs et les comparaisons, pour ensuite communiquer les modifications à faire sur les trajectoires ;
 - on utilise pour cela un ordinateur muni du logiciel LabVIEW.

Picomoteurs

- Les picomoteurs sont deux par miroirs, et permettent, par l'application d'une tension à un picomoteur, de faire pivoter le miroir selon l'axe correspondant. Cette tension est fournie par le driver du picomoteur, qui indique au picomoteur la tension correspondant au nombre de pas à appliquer via un câble RJ-11.
- Cette tension sert à utiliser l'actionneur piezzo servant à faire avancer ou reculer une partie d'une mâchoire, la deuxième étant fixe, et les deux en serrant une vis.

Deux moteurs et le module BIM





Le moteur en translation

Module de pilotage des moteurs BIM 2AX-BOCM

Le moteur rotatif



11/02/08

Acquisition des données



Pour l'acquisition des données on dispose du module BIM 6AI qui possède six voies d'acquisition de tension indépendantes comprise entre +10V et -10V. Le module communique avec l'ordinateur via un code sur 16bits. En lisant ce message comme un entier signé on obtient une valeur entre 32767 et -32768 correspondant à la tension en entrée de l'une des voies. Si celle-ci est de 10V on lira 32767, il faut donc diviser par 3276,7 pour convertir la valeur lue en volts.

11/02/08

Carte Courant - Tension



Perspective du LASER de 10 PW

- Le laser Pétawatt (30 J, 30 fs) pourrait être commercialisé par THALES et/ou par AMPLITUDE ; il a été dimensionné avec les modèles validés précédemment par le LOA.
- Le taux de répétition initial de 0,1 Hz serait porté à 10 Hz dans une deuxième phase.
- Un système de 10 lasers PW sera mis au point lors de la phase initiale du projet APOLLON qui fait partie du programme français ILE.

Perspectives...

- En ce qui concerne les perspectives des futurs lasers de 10 Pétawatt, elles sont nombreuses. Les sources de particule créées avec ce type de laser, par exemple, devraient posséder des propriétés nouvelles (en terme de brièveté, de cohérence).
- Cela devrait ouvrir la voie a des applications très diverses, en médecine, radiobiologie, radiographie, physique et ingénierie énergétique nucléaire, physique du solide, chimie... applications qui dépassent le cadre de la physique des plasmas et qui rendent encore plus passionnant ce domaine de recherche.



Merci de votre attention !





