

Thèse à pourvoir à LP3 – Marseille – Luminy

Résumé : Le laboratoire LP3 recherche pour une thèse un étudiant titulaire d'un Master M2, ayant de fortes compétences en Optique et Lasers, Matériaux, Plasmas froids et denses. La thèse, dont le sujet a été sélectionné comme prioritaire pour un financement DGA/AMU, porte sur l'étude de l'endommagement en régime d'impulsions ultracourtes (10 – 30 fs) de matériaux diélectriques et métalliques.

Pour postuler, contacter au plus tôt et avant le 10 Mai 2014:

- O. UTEZA :

☎ : +33 (0)4 91829283

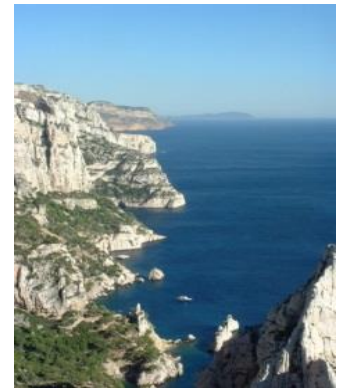
✉ : uteza@lp3.univ-mrs.fr

- M. SENTIS :

☎ : +33 (0)4 91829280

✉ : sentis@lp3.univ-mrs.fr

Attention : condition de nationalité pour postuler (UE et Suisse uniquement)



Présentation détaillée de la thèse :

Endommagement laser en régime ultrabref de cibles diélectriques et métalliques

1- Problématique et contexte scientifique :

L'endommagement de matériaux diélectriques et métalliques par impulsions laser ultrabrèves présente un double intérêt, applicatif et fondamental. L'endommagement d'un matériau en régime ultrabref est ainsi de nature déterministe et il est atteint très rapidement (réduction du seuil) par rapport à des durées d'impulsions plus longues [1,3] ce qui pose le problème de la fragilité des composants optiques en général, et plus particulièrement ceux des sources femtosecondes de puissance. Par ailleurs, les mécanismes de l'interaction laser-matière restent encore mal connus à de si courtes durées d'impulsion (10 – 30 fs) et il convient par exemple de préciser le rôle des différents canaux d'ionisation (photo-ionisation : ionisation multiphotonique et effet tunnel ; ionisation par impact) et des aspects électroniques de l'interaction (création d'une population dense d'électrons libres et très fortement hors équilibre dans ce régime de durée d'impulsion) sur le phénomène d'endommagement dans un régime de durée d'impulsion encore peu exploré.

Par exemple, un ensemble de questions restent largement ouvertes au sein de la communauté scientifique femtoseconde étudiant l'interaction laser – matière. Nous listons ainsi quelques problématiques actuelles auxquelles nous chercherons à répondre le plus précisément possible dans le cadre de ces travaux:

- 1) l'effet tunnel. S'il s'avère que ce dernier est le mécanisme d'ionisation prédominant à très courtes durées d'impulsion comme nos précédentes études (sur diélectriques uniquement) tendent à le montrer [1], peut-il conduire à un aspect déterministe exalté de l'interaction laser – matière (quel que soit le matériau), assurant précision et contrôle inégalés du seuil d'endommagement (et d'ablation) ainsi que sa prédictibilité ?

L'accès à de très courtes durées d'impulsions (impulsions de quelques cycles optiques), la possibilité de varier la longueur d'onde d'excitation et l'étude comparée de plusieurs matériaux de bande interdite différente permettront de faire varier le paramètre d'adiabaticité de Keldysh dans une large proportion et ainsi d'éprouver l'aspect déterministe de l'interaction dans des conditions d'irradiation privilégiant les différents canaux d'ionisation possibles. Cette étude sera étendue aux matériaux métalliques, ce qui n'a encore jamais été réalisé à notre connaissance.

- 2) quelles sont les dynamiques de croissance de la population d'électrons libres créée lors de l'irradiation laser dans des régimes ultracourts et dans des conditions variées d'ambiance (*en particulier, la comparaison air/vide*) ? En effet, il convient d'évaluer précisément les caractéristiques de formation de miroir plasma écran (dynamique d'établissement, coefficient de réflexion du miroir créé) avec des impulsions de quelques cycles optiques, sur des matériaux de nature différente et dans le vide. *Une attention particulière sera ici portée au paramètre vide*. Ce dernier permet en effet i) de s'affranchir d'artefacts de propagation liés au déclenchement d'effets nonlinéaires parasites (effet Kerr, ionisation de l'air) et donc d'avoir accès à la dynamique précise des électrons libres et aussi ii) d'être dans des conditions parfaitement identiques à celles des systèmes lasers ultra-intenses de niveau énergétique supérieur au PW actuellement en cours de développement dans le monde ou aussi de systèmes laser positionnés dans le vide. A notre connaissance, aucune étude n'a encore été réalisée sur ces aspects avec des impulsions de durée d'impulsion sub-15 fs et sur des cibles variées (diélectriques, métaux).

De nouveau, ces mesures doivent nous apporter un ensemble important de données (mesures de seuil dans l'air et dans le vide, bilan d'énergie déposée, etc.) permettant d'augmenter notre niveau de connaissance dans ce domaine, d'améliorer la précision des codes et la description de l'interaction laser – matière en régime ultracourt. En particulier, nous déterminerons, d'un point de vue appliqué, la tenue au flux (endommagement) de matériaux optiques d'intérêt, et d'un point de vue plus fondamental, nous préciserons les caractéristiques des effets électroniques se produisant à cette très courte échelle de temps dans des conditions très fortement hors équilibre ($T_e \gg T_i$).

2- Programme et contexte de déroulement de la thèse :

Comme cela a été mentionné précédemment, les objectifs de cette thèse sont multiples et ambitieux. Pour les réaliser, il s'agira de mener les actions suivantes (NB : T_0 marque le début de la thèse):

- i) *1^{ère} phase* ($T_0 + 6$ mois) : développement d'un banc d'endommagement compatible air/vide, adapté aux contraintes des impulsions ultracourtes et à l'interaction laser-matière avec des tailles de faisceau variables (petit et grand faisceau, typiquement avec des rayons, ou waists, de 10 à 100 μm sur cible). Une attention particulière sera de définir une stratégie de maintien et de contrôle de la durée d'impulsion jusqu'au plan d'interaction laser – cible. Cet arrangement expérimental sera représentatif des grandes installations de lasers intenses en cours de construction, comme Appollon – 10 PW par exemple, de l'utilisation de matériaux optiques dans l'espace et potentiellement soumis à une agression laser ultrabrève, ou encore des caractéristiques d'endommagement de grandes surfaces sans recourir à des techniques de balayage de matériaux optiques.

En particulier, nous chercherons à déterminer les niveaux énergétiques à partir desquelles les effets nonlinéaires sont significatifs et viennent perturber la propagation du faisceau et ainsi éventuellement introduire un biais dans l'évaluation des seuils d'endommagement (cas du setup d'endommagement dans l'air). Nous pourrons ainsi établir une base solide de comparaison des seuils mesurés dans des ambiances air ou vide en régime ultracourt et ainsi évaluer précisément l'influence de ce paramètre.

- ii) *2^{ème} phase* ($T_0 + 6$ mois à $T_0 + 30$ mois) : réalisation d'études théoriques et expérimentales d'endommagement de cibles diélectriques (silice fondue, saphire, diamant, etc.) et métalliques (cuivre,

aluminium) afin d'évaluer leur loi d'évolution (mesure de seuils [1-3]) à très courtes durées d'impulsion, de 10 à 50 fs typiquement), et de préciser la nature déterministe de l'endommagement dans le régime ultrabref [1], en particulier en fonction de la nature du matériau (métallique ou diélectrique). Il s'agira aussi de situer l'importance des paramètres électroniques (densité d'électrons libre initiale et existence d'une bande interdite) et thermo-mécaniques (conductivité thermique, module de Young) des matériaux sur leur tenue au flux en régime ultrabref.

Dans ce cadre, nous nous attacherons à la mesure précise des seuils d'endommagement et d'ablation dans les différents régimes de fonctionnement mais aussi à établir des bilans d'énergie précis par des mesures optiques de réflexion et de transmission intégrées et de type pompe-sonde permettant de déduire l'évolution de l'absorption du matériau [5]. Ces mesures permettront de corrélérer la quantité d'énergie absorbée (et les seuils d'endommagement observés) aux paramètres thermodynamiques des matériaux étudiés et ainsi de préciser le scénario d'endommagement (ou ablation) en régime ultracourt.

Un autre axe de recherche sera d'évaluer précisément les caractéristiques du miroir plasma écranneur créé, en particulier son coefficient de réflexion et sa dynamique d'établissement, selon les matériaux utilisés et le type d'ambiance (*pour rappel, nous porterons une attention particulière à l'influence du vide*).

- iii) 3^{ème} phase ($T_0 + 30$ mois à $T_0 + 32$ mois): réalisation d'expériences pilotes de tests de tenue au flux de matériaux optiques en grand faisceau ($w_0 \approx 50$ à $100 \mu\text{m}$) sous vide, afin d'apprécier les caractéristiques et limitations d'utilisation des matériaux et composants optiques en régime ultrabref.

- iv) 4^{ème} phase ($T_0 + 32$ mois à $T_0 + 36$ mois) : rédaction de la thèse et soutenance.

Pour mener à bien ces travaux, l'étudiant s'appuiera sur le système laser ASUR (plate-forme d'Applications des Sources Ultra-Rapides) et un environnement propice au sein du laboratoire LP3 (diversité et richesse des sources laser ; moyens importants d'analyse : AFM, MEB, microscope optique, confocal et Raman, spectromètre, etc. ; environ 5 personnes travaillant sur la thématique de l'interaction laser – matière en régime ultracourt). Pour précision, ASUR est une installation multifaisceaux environnée de caractéristiques (10/20 TW à 8 GW@15fs, 800 nm, 25 fs nominale, sortie < 15 fs disponible, OPA fs: UV - IR) D'un point de vue formation, l'étudiant aura idéalement de solides compétences en optique et lasers ainsi qu'en physique des matériaux et/ou plasmas.

Ces travaux de thèse se positionnent en complémentarité et en continuité des études, réalisées et en cours au laboratoire, sur l'étude de l'endommagement et de l'ablation de matériaux diélectriques en régime femtoseconde (jusqu'à 30 fs environ). En particulier, nous avons développé une méthodologie précise de mesure et d'analyse des seuils d'endommagement et d'ablation [1,3], et réalisé récemment un ensemble d'expériences (pompe – sonde et pompe – pompe notamment, [5]) permettant la détermination d'un bilan d'énergie précis (seuil, énergie absorbée, énergie réfléchie, diffusée et transmise) au sein de matériaux diélectriques (SiO_2 , saphir). Notons que les résultats déjà obtenus (pour l'instant uniquement dans l'air) ont ainsi permis de préciser la dynamique couplée de création d'un milieu fortement absorbant puis réfléchissant (miroir plasma) en fonction des paramètres d'irradiation (fluence, durée d'impulsion) et donc d'apporter de manière quantitative d'importantes informations sur la réponse d'un matériau initialement transparent à l'agression laser en régime fortement non linéaire (jusqu'à 25 fs) [2,3,5].

Dans le cadre de cette thèse, l'originalité sera d'aller plus loin dans ce type d'analyse, en étendant en particulier nos mesures à des durées plus courtes (< 15 fs), à des conditions d'ambiance différentes (vide) et à un panel varié de matériaux (diélectriques, métaux). Soulignons ici l'aspect particulièrement novateur et original qui sera d'étudier l'interaction laser – matière avec des impulsions de très courte durée d'impulsion (< 15 fs) et dans le vide.

Par ailleurs, nous collaborons étroitement avec des partenaires académiques nationaux et internationaux, spécialistes du sujet (par exemple le CELIA ou le LaHC en France ; le LPC-ANU en Australie ou l'INRS au Canada), ce qui permet de renforcer l'analyse numérique (modélisation) et l'interprétation des résultats obtenus [par exemple voir 3]. L'environnement scientifique de la thèse et du laboratoire est donc particulièrement approprié pour mener à bien les objectifs fixés par ces travaux.

3- Points clés et Résumé de cette demande de thèse :

Intérêt et originalité du sujet : Impulsions laser ultracourtes (< 15 fs) ; endommagement en conditions de grand faisceau et sous vide ; endommagement de matériaux diélectriques et métalliques avec des impulsions de quelques cycles optiques ; test de tenue au flux de composants optiques pour les projets lasers intenses (par exemple, Appollon-10 PW) ou autres domaines applicatifs (spatial par exemple).

Financement: Bourse de thèse cofinancée DGA/AMU (demande en cours). Condition de nationalité pour postuler (UE et Suisse uniquement).

Encadrement LP3 : O. Uteza (DR, HDR) (Tel: 04 91 82 92 83 ; Email : uteza@lp3.univ-mrs.fr). M. Sentis (DR, HDR) (Tel: 04 91 82 92 80, Email : sentis@lp3.univ-mrs.fr). La thèse se déroulera au LP3 (Marseille, Campus de Luminy) au sein de l'Axe « Optique, Lasers et matière ».

Connaissances et compétences requises : Physique, Optique et Lasers, Matériaux, Plasmas froids et denses, goût pour l'expérimental.

Moyens Laser : installation multifaisceaux ASUR et environnement (10/20 TW à 8 GW@15 fs, 800 nm, 25 fs nominale, sortie < 15 fs disponible, OPA fs: UV - IR).

Moyens d'analyse : analyse in-situ (réflectivité, transmissivité, bilan d'énergie, macroscopie), analyse post-mortem des échantillons : AFM, MEB, microscope optique (équipements disponibles au laboratoire).

5 Références LP3 sur le sujet (depuis 2010) :

1. SANNER N., UTEZA O., CHIMIER B., SENTIS M., LASSONDE P., LEGARE F., KIEFFER J.C. – Towards determinism in surface damaging of dielectrics using few-cycle laser pulses – **Applied Physics Letters** 96, 071111-3, 2010.
2. UTEZA O., SANNER N., BROCAS A., CHIMIER B., VARKENTINA N., SENTIS M., LASSONDE P., LEGARE F., KIEFFER J.C. – Control of material removal of fused silica with single pulses of few optical cycles to sub-picosecond duration – **Applied Physics A** 105, 131-141, 2011.
3. CHIMIER B., UTEZA O., SANNER N., SENTIS M., ITINA T., LASSONDE P., LEGARE F., VIDAL F., KIEFFER J.C. – Damage and ablation thresholds of fused silica in femtosecond regime: relevant physical criteria and mechanisms – **Phys. Rev. B**, 84, 094104-10, 2011.
4. BUSSIERE B., UTEZA O., SANNER N., SENTIS M., RIBOULET G., VIGROUX L., COMMANDRE M., WAGNER F., NATOLI J.-Y., Chambaret J.P. - Bulk laser-induced damage threshold of Titanium doped Sapphire crystals – **Applied Optics** 51 (32), 7826-33, 2012.
5. VARKENTINA N., SANNER N., LEBUGLE M., SENTIS M., UTEZA O. – Absorption of a single 500 fs laser pulse at the surface of fused silica: energy balance and ablation efficiency – **J. Appl. Phys.** 114, 173105, 2013.