

# Thèse à pourvoir à LP3 – Marseille – Luminy

## Financement DGA/AMU Acquis

**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, supportée par un financement DGA/AMU, porte sur l'étude de l'endommagement en régime d'impulsions ultracourtes (10 – 50 fs) de matériaux diélectriques et métalliques.

**Pour postuler, contacter au plus tôt et avant le 10 Mai 2015:**

- O. UTEZA :

☎ : +33 (0)4 91829283

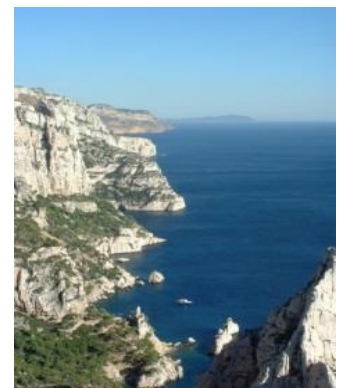
✉ : [uteza@lp3.univ-mrs.fr](mailto:uteza@lp3.univ-mrs.fr)

- M. SENTIS :

☎ : +33 (0)4 91829280

✉ : [sentis@lp3.univ-mrs.fr](mailto:sentis@lp3.univ-mrs.fr)

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



### Titre de la thèse :

## Endommagement laser en régime ultracourt de cibles diélectriques et métalliques

#### 1- Problématique et contexte scientifique :

L'endommagement de matériaux diélectriques et métalliques par impulsions laser ultrabrèves présente un fort intérêt applicatif et fondamental. L'endommagement d'un matériau en régime ultrabref est en effet atteint très rapidement (réduction du seuil) par rapport à des durées d'impulsions plus longues [1,3]. Cela pose de manière critique le problème de la fragilité (vulnérabilité) des composants optiques. Cela peut aussi constituer la base de développement de nouvelles stratégies pour l'endommagement facilité (exaltation d'agressibilité) de composants optiques. Ce point est d'ailleurs renforcé par l'extrême versatilité des sources laser femtosecondes, capables d'induire des interactions à distance, localisée et potentiellement en volume ou en surface de la plupart des matériaux.

Par ailleurs, d'un point de vue fondamental, les mécanismes de l'interaction laser-matière restent encore mal connus aux durées d'impulsion ultracourtes (< 50 fs). Il convient par exemple de préciser le rôle des différents voies d'ionisation 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.

Un ensemble de questions sont ainsi aujourd'hui largement ouvertes au sein de la communauté scientifique femtoseconde étudiant l'interaction laser – matière. Nous listons ci-après quelques problématiques actuelles auxquelles nous chercherons à répondre le plus précisément possible dans le cadre de ces travaux:

- 1) *Etude macroscopique de l'ionisation (photo-ionisation : ionisation multiphotonique et effet tunnel ; ionisation par impact) à courte durée d'impulsion (< 50 fs).*

Nos précédentes études (sur diélectriques uniquement) tendent à montrer l'importance de l'effet tunnel sur l'aspect déterministe de l'interaction laser – matière en régime ultracourt [1]. Nous chercherons à vérifier ce résultat et surtout à étendre sa portée. En effet, un déterminisme exalté de l'interaction laser – matière (quel que soit le matériau) assurerait 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 (en particulier vers l'UV, second harmonique du Ti :Sa à 400 nm et OPA disponible pour accéder à des longueurs d'onde plus courtes) 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.

- 2) *Etude et contrôle de la création de la population d'électrons libres.*

Nous nous attacherons à déterminer 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'éclairement? 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 à plusieurs dizaines de fs, sur des matériaux de nature différente.

Une attention particulière sera portée *aux stratégies d'éclairement, composées d'une impulsion unique (de durée variable) ou d'une succession d'impulsions (double pulse) de caractéristiques (durée, délai de séparation, fluence) judicieusement choisies* afin d'augmenter le dépôt d'énergie au sein du matériau cible. Un autre point particulier d'intérêt consistera à élargir ce type d'études *dans le domaine du proche UV (300 à 400 nm)* pour mesurer les caractéristiques de couplage de l'énergie laser au sein du matériau cible, dans un domaine spectral où la vulnérabilité des matériaux optiques est attendue (réduction de la valeur du seuil).

Ces mesures doivent nous apporter un ensemble important de données (seuils, bilan d'énergie déposée, propriétés optiques transitoires de réflexion et transmission, 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 ( $T_e \gg T_i$ ). A notre connaissance, aucune étude n'a encore été réalisée sur ces aspects avec des impulsions de durée sub-15 fs et sur des cibles variées (diélectriques, métaux).

## 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<sup>ère</sup> phase ( $T_0 + 6$  mois)*: développement d'un banc d'endommagement, adapté aux contraintes des impulsions ultracourtes et à l'interaction laser – cibles solides (diélectriques, métaux) et avec des tailles de faisceau variables (petit et grand faisceau, typiquement avec des rayons, ou waists, de 10 à 100  $\mu\text{m}$  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 caractéristiques d'endommagement *en géométrie de petit et grand faisceau*, sans recourir à des techniques de balayage de la surface de la cible.

- ii) *2<sup>ème</sup> 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 aussi à différentes longueurs d'onde d'excitation (fondamental à 800 nm et second harmonique à 400 nm principalement). Il s'agira aussi de préciser la nature déterministe de l'endommagement dans le régime ultrabref [1] en fonction de la nature du matériau (métallique ou diélectrique). Nous chercherons également à déterminer l'influence du paramètre « taille » (dimension du faisceau sur cible) et stratégie d'éclairement (simple/double impulsion, fondamental/second harmonique) sur le phénomène d'endommagement et en particulier la valeur du seuil.

Cela contribuera à répondre de manière complète à l'aspect déterministe de l'endommagement en régime ultracourt et de mieux situer la notion d'importance des défauts en régime fs, pour comparaison notamment à ce qui est observé en régime ns (endommagement extrinsèque ou purement intrinsèque comme a priori attendu en régime fs). Ces travaux permettront enfin de situer l'importance des paramètres électroniques (densité d'électrons libres initiale et transitoire, existence d'une bande interdite) et thermo-mécaniques (conductivité thermique, module de Young) des matériaux ou de l'importance des stratégies d'éclairement (densité d'électrons libres transitoire) sur la 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 [5,7]. 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.

On cherchera également à 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 la stratégie d'éclairement utilisé (*simple ou double impulsion, longueur d'onde*).

- iii) *3<sup>ème</sup> phase ( $T_0 + 30$  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 @ 25 fs - 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 [7] 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<sub>2</sub>, saphir). Notons que les résultats déjà obtenus 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) [2,3,5-7].

*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 stratégies d'éclairement (double impulsion notamment) et longueurs d'onde ( $\leq 400$  nm) différentes 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).*

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- Résumé, points forts et contexte de la thèse :

*Intérêt et originalité du sujet :* Impulsions laser ultracourtes (< 15 fs) ; endommagement de matériaux diélectriques et métalliques avec des impulsions de quelques cycles optiques et à différentes longueurs d'onde; endommagement et stratégie d'éclairement.

*Encadrement LP3 :* O. Utéza (DR, HDR) (Tel: 04 91 82 92 83 ; Email : [uteza@lp3.univ-mrs.fr](mailto:uteza@lp3.univ-mrs.fr)).  
M. Sentis (DR, HDR) (Tel: 04 91 82 92 80, Email : [sentis@lp3.univ-mrs.fr](mailto:sentis@lp3.univ-mrs.fr))  
LP3, UMR 7341, Pôle Scientifique et Technologique de Luminy, 163, avenue de Luminy, Case 917, 13288 Marseille cedex 09

*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 @ 25 fs - 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).

#### 4- Références de l'équipe sur le sujet et bibliographie (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.
6. LEBUGLE M., SANNER N., UTEZA O., SENTIS M. - Guidelines for efficient direct ablation of dielectrics with single femtosecond pulses - **Appl. Phys. A** 114 (1), 129-142, 2014.
7. LEBUGLE M., SANNER N., VARKENTINA N., SENTIS M., UTEZA O. - Dynamics of femtosecond laser absorption of fused silica in the ablation regime - **J. Appl. Phys.** 116, 063105, 2014.