

ASUR : plateforme d'applications des sources laser ultra-rapides pour l'imagerie X et l'interaction laser-matière

O. Utéza^{1,a}, P. Blandin¹, L. Charmasson¹, G. Coustillier¹, D. Grojo¹,
A. Kabashin¹, M. Lebugle¹, N. Sanner¹, V. Tcheremiskine¹, M. Sentis¹,
F. Légaré² et J.C. Kieffer²

¹ LP3, UMR 7341 CNRS – Aix-Marseille Université, C. 917, 163 Av. de Luminy, 13288
Marseille Cedex 09, France

² INRS, Energie, Matériaux et Télécommunications, 1650 bld. Lionel Boulet, Varennes
(Québec), Canada, J3X 1S2

Résumé. Nous présentons la plateforme ASUR, en cours d'installation au laboratoire LP3, et plusieurs projets de recherche en développement autour de cette infrastructure. Cette chaîne laser unique permet au laboratoire LP3, en partenariat avec différents acteurs académiques et industriels, nationaux et internationaux, de mener des activités de recherche autour de la physique des interactions laser – matière à fort flux et à très faible durée d'impulsion et du développement des procédés laser.

1. INTRODUCTION

La motivation première du projet ASUR (Applications des Sources laser Ultra-Rapides) est de construire une plateforme laser basée sur une technologie de pointe, pour s'intéresser aux interactions entre un laser ultra-rapide intense (et aussi de forte puissance moyenne) et différents matériaux. Cette plateforme a vocation à être un lieu d'échanges entre scientifiques de différentes communautés, et sera ouverte aux collaborations avec les milieux académique, hospitalier et industriel. Elle permettra également d'offrir une formation de personnel hautement qualifié dans des domaines variés (optoélectronique, photonique, imagerie, ...). D'un point de vue scientifique, on peut identifier deux objectifs généraux : i) explorer de nouvelles applications des lasers TW ultrarapides et à cadence élevée, et des sources secondaires associées (OPA, rayons X, ...); ii) continuer à développer des connaissances fondamentales et appliquées de l'interaction laser – matière à moyen et fort flux. De manière connexe, nous chercherons aussi à identifier les barrières technologiques qui limitent l'augmentation de la puissance moyenne (i.e. la cadence) des lasers TW ultrarapides. Après avoir présenté l'infrastructure laser ASUR, nous décrirons ensuite brièvement les premières thématiques scientifiques développées.

2. L'INFRASTRUCTURE LASER ASUR

La source laser ASUR (voir Figure 1) est développée et installée par Amplitude Technologies (Evry, France). Elle est basée sur la technologie Ti:Sa et CPA (Chirped Pulse Amplification) et délivre quatre sorties laser principales à 800 nm, avec la possibilité de combiner deux d'entre elles (par exemple haute et basse énergie). Les caractéristiques détaillées de ces différentes lignes sont résumées dans le tableau 1.

^a e-mail : uteza@lp3.univ-mrs.fr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 2.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

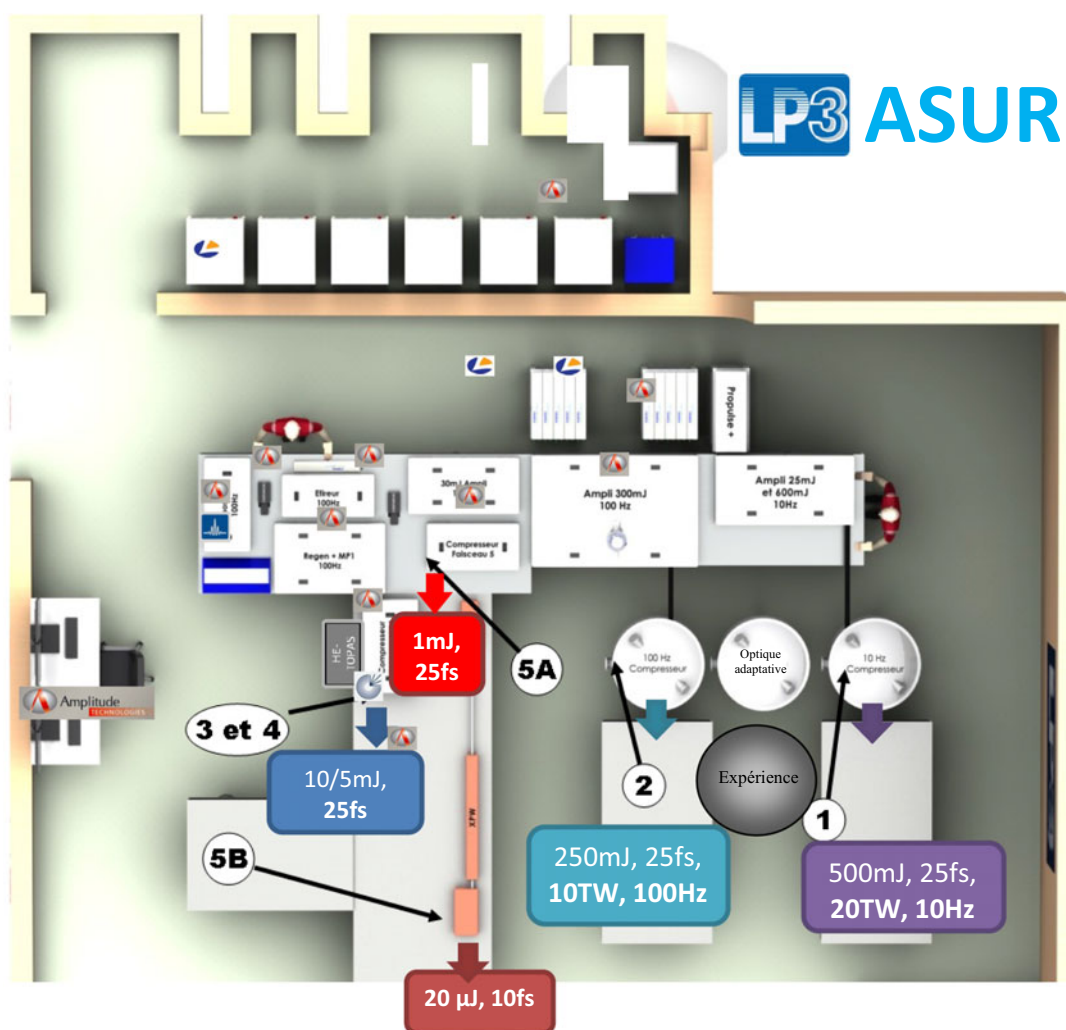


Figure 1. Vue d'artiste de la plateforme ASUR au laboratoire LP3.

Tableau 1. Principales caractéristiques des sorties faisceaux du système laser ASUR. La stabilité rms en énergie est typiquement égale à 1 %.

Faisceau ASUR @ 800 nm	Durée	Energie	Cadence	Diamètre à $1/e^2$	Puissance crête	Puissance moyenne
1	25 fs	500 mJ	10 Hz	45 mm	20 TW	5 W
2	25 fs	250 mJ	100 Hz	45 mm	10 TW	25 W
3/4	25 fs	15 (10/5) mJ	100 Hz	22,5 mm	0,6 TW	1,5 W
5a	25 fs	1 mJ	100 Hz	15 mm	40 GW	1,5 W
5b	~10 fs	20 μ J	100 Hz	15 mm	2 GW	-

Par ailleurs, la chaîne laser inclut dans son architecture plusieurs éléments (étage de pré-amplification comportant un absorbant saturable, cellule de Pockels de nettoyage, etc.) permettant d'assurer un haut niveau de contraste temporel (rapport de l'intensité max à l'intensité contenue dans

Tableau 2. Valeurs de contraste temporel mesurées sur la ligne 2 (10 TW @ 25 W) de l'infrastructure laser ASUR (mesure réalisée avec un autocorrélateur Sequoia, commercialisé par Amplitude technologies). Le contraste ns correspond au contraste incohérent ($I_{\max}/I_{\text{ASE, répliques ns}}$) lié au développement de l'ASE (émission spontanée amplifiée) et/ou aux répliques issues de l'amplificateur régénératif et le contraste ps au contraste cohérent ($I_{\max}/I_{1\text{ps}, 10\text{ps}}$) lié aux distorsions de phase de l'impulsion principale (défauts de compression) et aux répliques éventuellement générées par des optiques.

ASUR	Contraste ns	Contraste @ 10 ps	Contraste @ 1 ps
Ligne 2	10^9	2×10^8	2×10^4

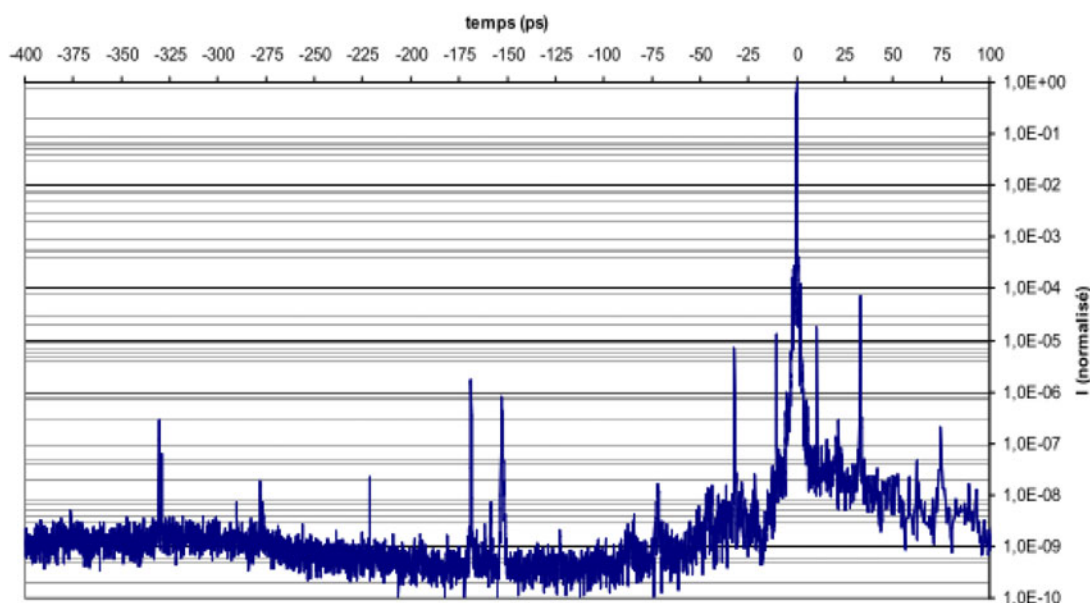


Figure 2. Trace d'autocorrélation du 3^{ème} ordre observée sur la ligne 2 (10 TW @ 25 W).

ses pieds ou dans les répliques de l'impulsion). Les valeurs de contraste typiquement obtenues, par exemple sur la ligne 2 (10 TW @ 25 W), sont résumées dans le tableau et la figure 2. Ces valeurs sont propices pour le développement d'expériences laser-matière à haut flux ($I \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$) où il est souhaitable que l'impulsion laser principale interagisse avec une cible solide ou un gradient de densité électronique L/λ contrôlé (L : longueur du gradient). Maîtriser ce paramètre est en particulier important pour la génération de sources X incohérentes [1].

Enfin, les sources secondaires suivantes seront bientôt disponibles: i) un OPA commercial, générant des impulsions de 35 fs environ à 100 Hz sur un large spectre ($0,24 - 9 \mu\text{m}$) et avec une énergie comprise entre $30 \mu\text{J}$ et 1 mJ, ii) une source de rayons X ($K\alpha$) ponctuelle ($< 10 \mu\text{m}$), sub-picoseconde et à haute cadence, développée en collaboration avec l'INRS-EMT (Varenes, Canada).

Ces différents faisceaux s'accompagneront tous d'instruments de contrôle et de caractérisation, et des chambres sous vide seront disponibles pour des expériences. La plate-forme ASUR est installée dans les locaux du laboratoire LP3, dans une partie du bâtiment mise en conformité pour répondre aux besoins de la plate-forme, notamment en terme de sécurité des utilisateurs (protection laser et radioprotection).

3. ÉTUDES ET APPLICATIONS

Les thématiques scientifiques suivantes sont actuellement en cours de développement ou d'étude sur la plate-forme ASUR :

- Etude de l'interaction laser-matière pour des impulsions ultracourtes ($\sim 10 - 100$ fs), et pour des longueurs d'onde allant de l'IR à l'UV : interaction laser-surface, ablation en régime ultrarapide et dynamique de l'ablation, interaction laser-nanoparticules, interaction laser-liquide, processus dynamiques dans la matière condensée.
- Endommagement laser. Procédés laser à haute cadence.
- Utilisation des lasers en nanoscience, nanotechnologie et biophotonique : formation d'agrégats et de nanoparticules, structuration et traitement à l'échelle nanométrique, interaction avec des structures plasmoniques et des tissus biologiques.
- Développement de sources X secondaires à haute cadence ; applications à l'imagerie.
Nous décrivons ci-dessous plusieurs d'entre elles en détails.

3.1. Interaction laser-matière à moyen flux en régime ultracourt

La thématique de l'endommagement et de l'ablation de matériaux diélectriques par impulsions laser ultra brèves présente un intérêt à la fois applicatif et fondamental. Concernant le traitement des matériaux diélectriques, les lasers femtosecondes permettent aujourd'hui d'atteindre une résolution spatiale largement sub-micrométrique, qui, combinée à une très forte limitation des effets thermiques, permet de produire des usinages de haute qualité. Ces deux caractéristiques proviennent essentiellement du caractère fortement non linéaire de l'absorption dans les matériaux à large bande interdite. L'utilisation d'impulsions ultracourtes permet en outre de séparer les mécanismes de dépôt d'énergie dans le matériau (création d'une population d'électrons libres) et de l'endommagement/ablation (fusion/vaporisation associée à une mise en mouvement des ions), puisque les échelles temporelles associées sont différentes.

Nos premiers travaux portent sur deux aspects principaux. Le premier est purement applicatif et consiste à développer un banc de mesure en régime ultracourt, capable d'évaluer des fluences seuils d'endommagement sur une très large plage de durée d'impulsion ($\sim 10 - 100$ fs). L'architecture du banc d'endommagement s'appuie sur celui déjà développé au laboratoire sur un système laser émettant des impulsions sub-picosecondes [2]. Il comprend : i) un module de transport et de mise en forme laser gérant en particulier le nombre de tirs (shutter et/ou chopper mécaniques), l'énergie sur cible (ligne d'atténuation spécialement conçue pour les impulsions ultracourtes, cf. www.femtooptics.com) et la polarisation du faisceau, ii) un module de focalisation laser (miroir parabolique) gérant la taille de la tache laser sur l'échantillon, iii) un module de tenue, de positionnement et de translation de l'échantillon compatible vide et capable de recevoir des composants ou matériaux optiques variés, iv) un module de visualisation in-situ de l'échantillon, et v) un module de commande gérant l'automatisation du banc et le déroulement d'un test d'endommagement. La durée d'impulsion nominale (25 fs) est variée en utilisant : i) pour raccourcir la durée d'impulsion, la technique XPW (modulation de phase croisée, processus non-linéaire du 3^{ème} ordre [3]) combinée à un dispositif optique de contrôle de la dispersion de retard de groupe (à base de miroirs chirpés) en bout de chaîne de la ligne 5 et ii) pour allonger l'impulsion, la propagation dans des matériaux dispersifs.

Les tests utiliseront les normes de type 1on1 et Non1 (i.e. un tir unique ou N tirs par site, séquence répétée 30 fois par pas d'énergie) en incidence normale ou oblique et l'analyse de l'endommagement (avec la détermination d'un seuil d'endommagement) est réalisée a posteriori par examen post-mortem de l'échantillon au microscope optique, selon la méthodologie décrite dans la référence [2] et éprouvée en régime ultracourt lors de l'étude du seuil d'endommagement de la silice fondue [4,5].

La seconde thématique développée aborde la physique de l'interaction laser-matière à moyen flux en régime d'ablation ($\sim 10^{14}$ W/cm²) afin d'étudier finement l'absorption en régime ultracourt de l'énergie laser par un matériau cible (par exemple des matériaux diélectriques largement utilisés comme SiO₂, matériau piègeur, ou le saphir, non-piégeur). Les résultats déjà obtenus ont démontré d'une part l'influence du canal de création des électrons libres initiaux (ionisation tunnel ou multiphotonique) sur le caractère déterministe de l'interaction, et d'autre part la contribution significative de l'avalanche

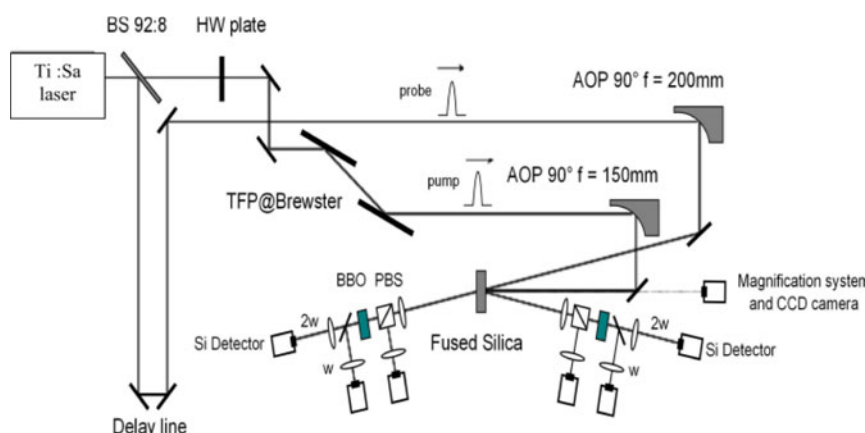


Figure 3. Schéma de principe de l'expérience pompe – sonde développée sur la ligne 5 (1 mJ, 25 fs). La pompe (resp. sonde) est focalisée par un miroir parabolique de focale 150 mm (resp. 200 mm). L'énergie réfléchie et transmise de la sonde est mesurée en fonction du délai pompe – sonde. Les signaux réfléchi et transmis sont filtrés en polarisation, temporellement et spectralement (doublement de fréquence) pour plus de précision et s'affranchir en particulier du plasma émis.

électronique, même à très courte durée d'impulsion [4,5]. Dans le cadre de nouvelles recherches, nous menons une étude résolue en temps de l'absorption et de la dynamique de création d'une population d'électrons libres, afin de définir la fraction d'énergie laser réellement absorbée par le matériau ainsi que la dynamique de ce phénomène. Cela permet de déterminer les propriétés transitoires du matériau et leur influence sur l'impulsion excitatrice elle-même et de définir des informations utiles (seuils, efficacité d'ablation, morphologie et qualité d'ablation) pour le développement de procédés de micro-usinage [6].

Des techniques pompe-sonde sont ainsi implémentées (cf. Figure 3) afin de sonder de manière d'abord intégrée, puis résolue en temps (résolution ~ 10 fs), les propriétés transitoires du matériau liées à la formation d'une densité importante d'électrons libres dans le matériau en fonction des paramètres laser. L'analyse spectrale et polarimétrique des impulsions pompe et sonde transmises et réfléchies par le matériau nécessite la gestion rigoureuse du spectre du laser et du plasma émis avec des filtrages adéquats. La connaissance expérimentale de la dynamique de création du plasma d'électrons libres couplée à des travaux de modélisation théorique basés sur l'équation de Helmholtz [7] permettra de clarifier la compréhension des mécanismes d'ablation aux temps ultracourts. En particulier, les conditions optimales de dépôt d'énergie (forte absorption mais réflexion maintenue relativement faible, i.e. avant l'apparition d'un miroir plasma efficace) ou d'ablation électronique froide (éjection de la matière avant le transfert d'énergie des électrons vers le réseau) seront recherchées. À l'inverse, la possibilité de filtrer l'impulsion incidente (amélioration du contraste, ...) sera également explorée. La connexion avec les niveaux énergétiques des seuils d'endommagement et d'ablation sera établie, et la possibilité de contrôler finement le résultat final d'ablation (efficacité, profondeur, contrôle nanométrique, résolution, etc.) sera étudiée à l'aide de techniques de microscopie (optique, AFM, MEB).

Enfin, les résultats obtenus concernant la création de façon efficace et contrôlée d'une population d'électrons libres permettront de mettre au point des stratégies d'optimisation des impulsions (sculpture temporelle, spectrale, en polarisation, etc.) pour les applications de micro-usinage utilisant des impulsions ultracourtes.

3.2. Source plasma de rayonnement X créée par laser ultra-intense : application à l'imagerie médicale

Depuis une dizaine d'années des nouvelles sources de rayons X de très courte durée d'impulsions (quelques picosecondes à la centaine de femtosecondes) sont développées grâce aux progrès

technologiques accomplis sur les sources lasers ultrabrèves et de forte puissance [8]. L'émergence de ces nouvelles sources X ultrabrèves ouvre de nouveaux horizons pour la science ultra-rapide et la science des rayons X. Les applications en cours et potentielles sont nombreuses et variées (physique du solide et des surfaces, physique des plasmas, femtochimie, biologie, santé, etc.). Ces sources de rayons X « durs » (rayons X avec des énergies >10 keV) sont créées par l'interaction d'une impulsion laser intense ($I_{\text{las}} > 10^{17}$ W/cm²) avec une cible solide. Le rayonnement est produit par deux mécanismes : le rayonnement quasi-continu lié au freinage des électrons par les atomes de la cible (Bremsstrahlung) et les raies caractéristiques liées à la désexcitation radiative d'un électron lors de sa recombinaison sur les couches profondes du nuage électronique (rayonnement $K\alpha$, $K\beta$, ...).

L'objectif principal de ces recherches consistera donc à caractériser et optimiser une source femtoseconde de rayons X durs de type $K\alpha$ obtenue par l'interaction des lignes intenses du système ASUR (lignes 1 et 2, cf. paragraphe 2) avec une cible solide. En particulier, il s'agira d'étudier et de rechercher les meilleurs paramètres laser (intensité, contraste temporel, durée, longueur d'onde) et conditions d'interaction (nature et géométrie de la cible, angle d'interaction, mise en forme spatio-temporelle de l'impulsion, etc.) pour optimiser le flux de rayons X et les caractéristiques générales de la source ainsi créée. En particulier, nous étudierons l'influence du contraste temporel de l'impulsion laser sur la taille, la brillance, l'efficacité de la source X secondaire ainsi que sur la durée des impulsions créées. On cherchera aussi à générer une source de rayons X de très petite taille (~ 5 μm), une des applications visées étant l'imagerie du petit animal par contraste de phase qui nécessite d'avoir une source de rayons X ponctuelle.

Pour mener à bien ces recherches, nous nous appuyerons sur une collaboration étroite avec l'INRS (<http://www.emt.inrs.ca/>), laboratoire situé à Montréal et pionnier dans ce domaine.

Remerciements

La plateforme ASUR a pu être mise en place grâce au soutien financier de l'Union Européenne, du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, du Conseil Général des Bouches-du-Rhône, de la Ville de Marseille, du CNRS, de l'Université de la Méditerranée et du Pôle de Compétitivité Optitec.

Références

- [1] P. Gibbon, *Short pulse laser interactions with matter: an introduction* (Imperial College Press, London, 2005)
- [2] N. Sanner, O. Utéza, B. Bussière, G. Coustillier, A. Leray, T. Itina, M. Sentis, *Appl. Phys. A* **94** (4), 889 (2009)
- [3] L.P. Ramirez, D.N. Papadopoulos, A. Pellegrina, P. Georges, F. Druon, P. Monot, A. Ricci, A. Jullien, X. Chen, J.P. Rousseau, R. Lopez-Martens, *Opt. Exp.* **19** (1), 93 (2011)
- [4] N. Sanner, O. Utéza, B. Chimier, M. Sentis, P. Lassonde, F. Légaré, J.C. Kieffer, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 071111 (2010)
- [5] B. Chimier, O. Utéza, N. Sanner, M. Sentis, T. Itina, P. Lassonde, F. Légaré, F. Vidal, J.C. Kieffer, *Phys. Rev. B.* **84**, 094104 (2011)
- [6] O. Utéza, N. Sanner, A. Brocas, B. Chimier, N. Varkentina, M. Sentis, P. Lassonde, F. Légaré, J.C. Kieffer, *Appl. Phys. A* **105**, 131 (2011)
- [7] M. Lebugle, N. Sanner, S. Pierrot, O. Utéza, *Proceedings of HPLA 2012* (to be published)
- [8] J.C. Kieffer, A. Krol, Z. Jiang, C.C. Chamberlain, E. Scalzetti, Z. Ichalalene, *Appl. Phys. B* **74**, S75 (2002)