

# Le choc-laser en 2006 : état de l'art et applications

P.Peyre, L.Berthe & R.Fabbro  
GERAILP-LALP, UPR 1578 CNRS, 94114 Arcueil cedex

## Introduction

Après de longues années de tâtonnements, le choc-laser est enfin arrivé à un véritable stade de maturité industrielle, favorisé par une compréhension fine de la physique du procédé, et par l'arrivée de nouvelles sources laser vraiment compatibles avec les impératifs de production. La France, avec près de 20 ans de recherches sur le sujet, reste l'un des leaders mondiaux au niveau de l'application et de la maîtrise de la technique, même si certaines questions sont encore aujourd'hui mal élucidées (problèmes de traitements sans revêtements), et si des problèmes de mise en œuvre du procédé persistent (traitements de zones occluses avec protection thermique). Nous brossons ici un état de l'art sur le procédé en 2006, en insistant sur les avancées et les applications industrielles les plus récentes.

## 1- Développements récents dans la compréhension de la Physique du procédé

### 1.1. Généralités

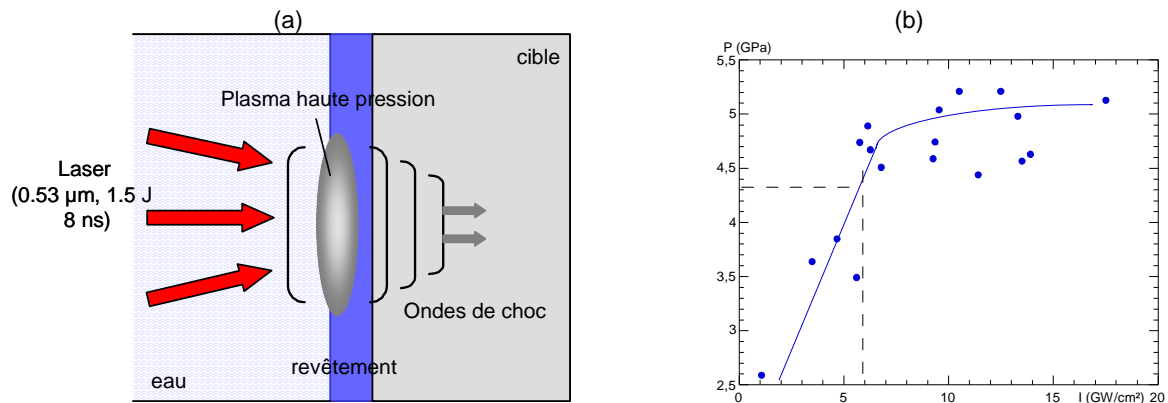
Le traitement des matériaux par choc-laser consiste à créer un plasma instantané à très haute pression (GPa) sur un matériau-cible, grâce à l'interaction de cette cible avec un laser impulsif à forte densité de puissance (GW/cm<sup>2</sup>, régime ns). Le phénomène d'ablation (vaporisation) qui en résulte crée donc le plasma (=gaz ionisé à haute température et haute pression), dont la détente est à l'origine des ondes de choc induites, et de la plastification de surface qui en résulte (Fig.1a).

Par rapport à ce principe de base, l'application concrète du procédé passe par l'utilisation : (1) d'un liquide de confinement (de l'eau) pour augmenter la pression du plasma, (2) d'un revêtement protecteur (peinture ou adhésif) pour absorber les effets thermiques induits par le plasma, et ne conserver que l'impulsion mécanique  $P=f(t)$ . L'optimisation des pressions de choc en fonction des conditions expérimentales est alors le paramètre clé qui va conditionner le rendement de l'interaction.

### 1.2. Modèle physique de confinement

Dans sa thèse de doctorat récente, A.Sollier [1] a développé un modèle hydrodynamique auto-consistant qui permet de calculer les chargements thermiques et mécaniques induits par les plasmas confinés. Ce modèle, intégrant un coefficient d'absorption  $A_p$  (formule 1), et validé par des mesures expérimentales des pressions de choc par vélocimétrie Doppler, et des mesures d'épaisseurs ablatées, confirme l'intérêt des courtes durées d'impulsions (3-10 ns plutôt que 25-30 ns), et des longueurs d'onde de 1.06  $\mu\text{m}$  ou 0.53  $\mu\text{m}$  pour générer des amplitudes de pression élevées. Ces résultats montrent également l'intérêt d'utiliser des petits impacts (1-2

mm plutôt que 6-10 mm), afin de limiter le chauffage des cibles traitées. Dans des conditions optimisées, les pressions de choc sont de l'ordre de 5 GPa à (1.06  $\mu\text{m}$  ou 0.53  $\mu\text{m}$  - 10 ns : Fig.1b), et de 7 GPa à (1.06  $\mu\text{m}$  - 3 ns). La différence est attribuée à une augmentation des intensités de claquage, au delà desquelles, l'eau de confinement n'est plus transparente au rayonnement laser.



**Figure 1 :** (a) Principe d'un choc-laser en régime confiné : l'onde de choc issue de la détente du plasma laser crée une plastification de la surface à l'origine des contraintes de compression, (b) Pressions de choc générées sur la gamme 1-20  $\text{GW}/\text{cm}^2$  à 0.53  $\mu\text{m}$  avec des impulsions de 10 ns

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 4}} \cdot \sqrt{Z(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})} \cdot \sqrt{A_p \cdot I(\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2})} \quad (1)$$

avec  $Z$  = impédance réduite (eau/cible),  $\alpha$  = rendement d'interaction = proportion d'énergie consacrée à la pression du plasma (entre 0.25 et 0.35),  $A_p$  = absorptivité (autour de 0.7-0.8) intégrant les pertes énergétiques

Dans un régime d'interaction classique (5 +/- 3  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ), les températures mises en jeu dans le plasma sont de l'ordre de 15000 +/- 5000 K, les masses ablatées par impulsion sont de 0.5-1  $\mu\text{m}$  (acier), à 2-3  $\mu\text{m}$  (Aluminium), et les pressions comprises entre 2 GPa et 5-6 GPa. Sans revêtement thermo-absorbant, les profondeurs affectées thermiquement dans la cible métallique (calculées simplement par la résolution de la loi de Fourier), sont alors de l'ordre de 10-20  $\mu\text{m}$  (Acier) à 50  $\mu\text{m}$  (Aluminium).

## 2- Les développements récents du procédé

### 2.1. Les lasers et le transport du faisceau

Les développements récents les plus importants du procédé ont concerné les lasers de puissance. Deux solutions s'offrent alors aux industriels utilisateurs :

- travailler avec la source laser développée par le laboratoire LLNL pour MIC, c'est à dire avec un système permettant de délivrer plusieurs dizaines de J à quelques Hz, avec un faisceau rectangulaire de très bonne qualité spatiale. Une version transportable d'une telle unité de traitement est d'ores et déjà disponible [2]
- utiliser des petites sources laser industrielles fournies par des fabricants de laser (Continuum ...), qui délivrent de 3 à 10 J par impulsion à 10 Hz. En

raison de l'énergie limitée par pulse, il convient alors d'utiliser des impacts de diamètre réduits (1-3 mm), par rapport à la source LLNL (5-10 mm).

Ces deux types de sources sont utilisables. A titre d'exemple, General Electrics [3] est en train de changer de configuration de traitement, et a opté récemment pour la solution « petits impacts », appliquée au traitement des bords d'aubes fan ou d'aubes de compresseur sur avions militaires (F15, F16 et B-1B) et depuis peu, civils. Leur critère est alors essentiellement d'ordre économique [4].

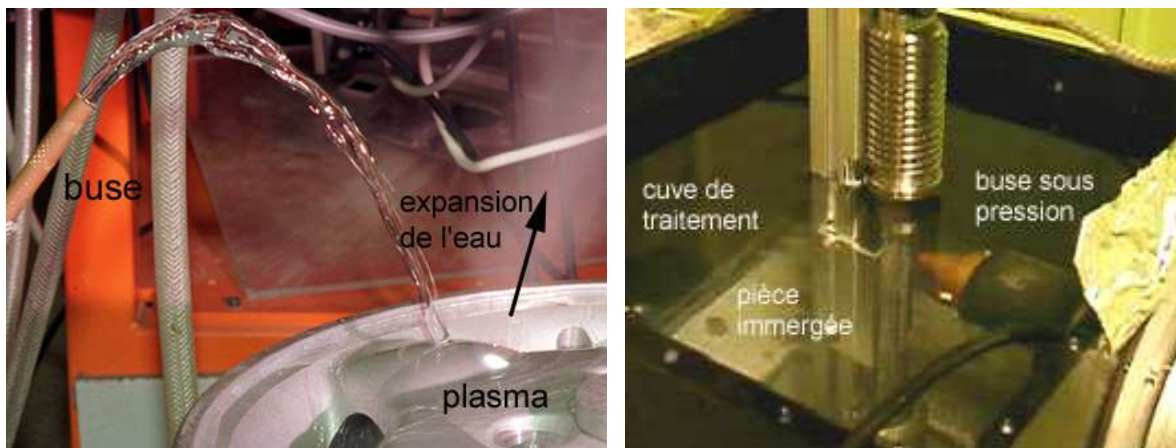
Enfin, récemment, la société Toshiba [5] a développé un système de choc-laser avec transport par fibre optique qui, bien que limité à des faibles énergies (0.3 J) donc des petits impacts (0.7 mm), augmente énormément la flexibilité du procédé.

## 2.2. Le confinement du plasma

Deux techniques sont envisageables pour réaliser le confinement du plasma par de l'eau, donc assurer des niveaux de pression suffisants pour plastifier les surfaces :

- (1) dans la première technique (la plus ancienne), des buses d'eau dirigées sur les zones à traiter entraînent un écoulement laminaire, sous forme d'un film de quelques mm qui suffit à réaliser le confinement.
- (2) La seconde technique consiste à immerger complètement la partie à traiter dans une cuve d'eau, et à utiliser une longueur d'onde ( $0.53 \mu\text{m}$ ) peu absorbée par l'eau.

La seconde technique est plus tolérante vis à vis de l'utilisation de fréquences de traitement élevées (l'interface pièce-eau varie peu). L'utilisation de buses est limitée par l'instabilité du film liquide à haute cadence, mais est plus souple d'utilisation sur des pièces de dimension importante. Parallèlement, suivant la géométrie des pièces à traiter, des irradiations verticales ou horizontales sont envisageables, qui ne modifient à priori pas les états mécaniques induits, puisque le plasma laser se détend toujours perpendiculairement aux surfaces traitées.

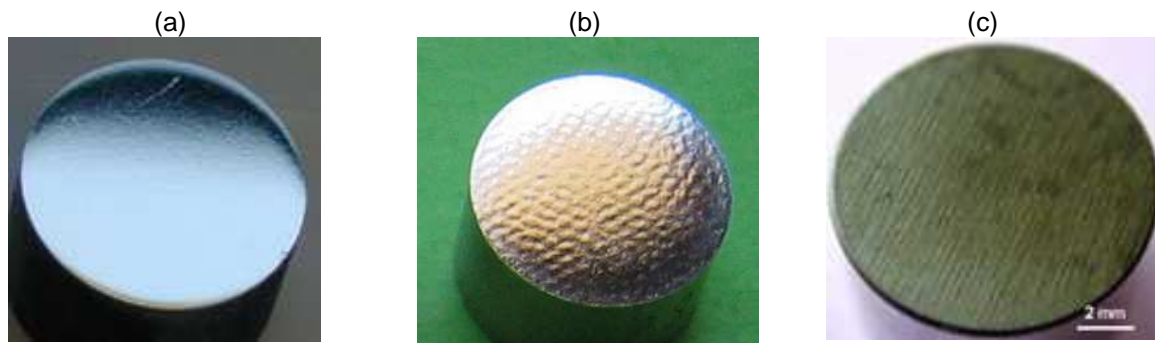


**Figure 2** : Configurations de traitement par choc-laser - (a) configuration externe avec buse d'eau , (b) configuration avec immersion de la pièce dans une cuve d'eau et buse sous pression

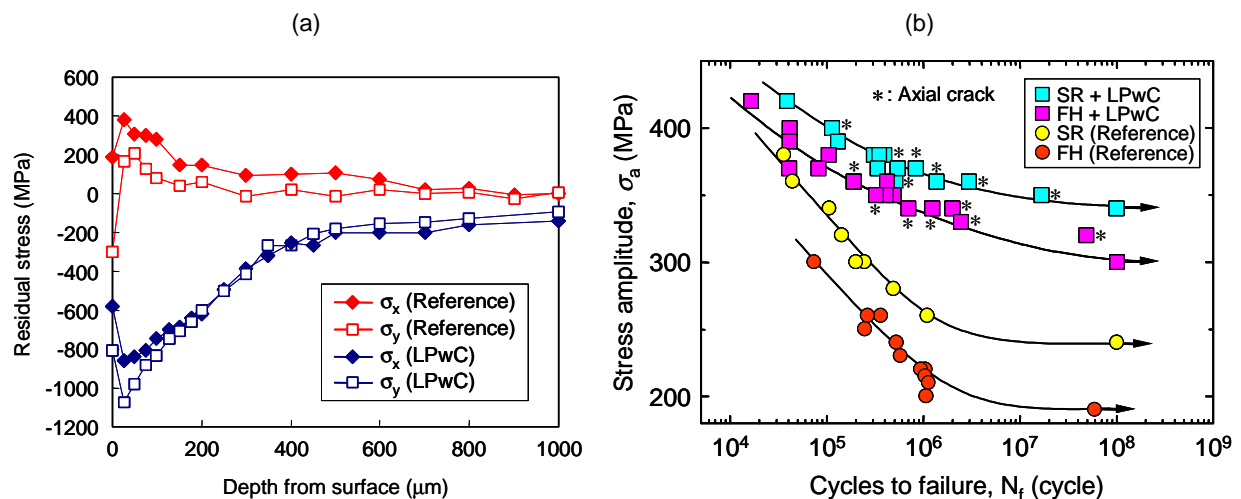
## 2.3. Le traitement de choc-laser avec et sans revêtement

Les travaux récents de Toshiba [5,6] ont montré la possibilité de générer des états de contraintes de compression par choc-laser sans utiliser de revêtements thermo-absorbants sur les joints soudés des réacteurs à eau pressurisée japonais en acier 304. Ce nouveau mode de traitement thermo-mécanique, à priori dégradant car

générateur d'ablation et d'effets thermiques, est encore mal compris aujourd'hui, mais semble promis à un bel avenir en raison de sa grande facilité de mise en œuvre. Dans le pire des cas, une couche très superficielle ( $< 5 \mu\text{m}$ ) serait le siège de contraintes de traction d'origine thermique, la sous-couche (0.6 mm à 1 mm) étant en compression. Le traitement a été validé, grâce à l'utilisation de petits impacts (0.4-0.8 mm), et de taux de recouvrement élevés (50 impacts/ $\text{mm}^2$ ), vis à vis de la résistance à la CSC des aciers inoxydables austénitiques 304 et 316, mais également vis à vis de la tenue en fatigue du 316L (Fig.4) et du Ti-6Al-4V [5]. En 2006, 10 centrales nucléaires avaient été traitées par CL, soit 20 % du parc nucléaire japonais, l'intérêt premier du procédé étant la possibilité de traiter in-situ sans avoir à vider les cuves de REP.



**Figure 3** : Surfaces (316L) traitées par choc-laser – (a) Impulsion courte (3 ns) et faisceau homogène de 15 mm – (b) petits impacts de 1.5 mm, (c) sans revêtement avec des impacts de 0.5 mm (formation d'une couche oxydée)



**Figure 4** : Traitement de Choc-laser sur acier 316L sans revêtement avec impacts de 0.4 mm - (a) contraintes résiduelles, (b) tenue en fatigue sur éprouvettes cylindriques (flexion rotative) (avec l'aimable autorisation de Y.Sano [5])

Les résultats obtenus sur Ti-6Al-4V indiquent également un bon comportement en fatigue à haute température (450°C), attribué à la stabilité de l'état d'écrouissage. Ces résultats sont à relier à ceux de Prevey [7], qui a mis en évidence une meilleure stabilité des contraintes résiduelles en température en choc-laser, qu'en grenailage de précontrainte, sans expliquer précisément l'origine du phénomène.

### 3. Les états mécaniques induits

#### 3.1. Généralités

Les spécificités du choc-laser vis à vis des autres traitements mécaniques restent, outre l'absence de contact :

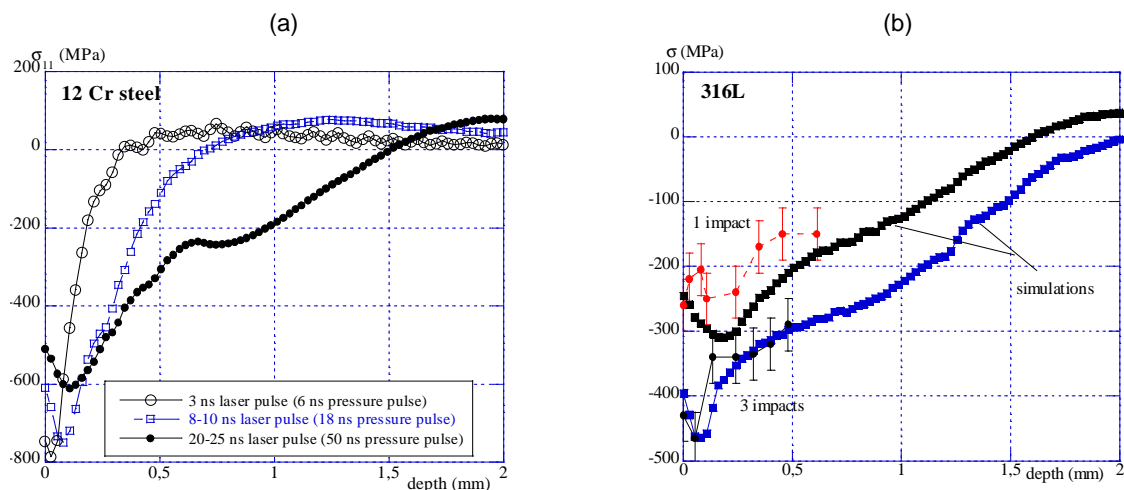
- le faible niveau d'érouissage des surfaces (en général +10-20 %) lié à la brièveté des déformations ( $< 0.1 \mu\text{s}$ ) ;
- les grandes profondeurs affectées plastiquement (de 0.7 à 2 mm : Fig.4a), favorisées par la répétition des impacts et des impulsions longues ;
- la qualité des surfaces traitées ( $R_a$  varie peu).

Enfin, par rapport au grenailage classique, le « grenailage photonique » est considéré comme déterministe car les positions des impacts sont programmées avant traitement (le grenailage est considéré comme un traitement stochastique).

#### 3.2. Simulation par éléments finis

Depuis l'avènement du Choc-laser en tant que traitement « industriel », différentes tentatives de simulations par éléments finis des effets mécaniques induits ont paru [8,9], essentiellement en axisymétrie, en considérant deux étapes : une étape de propagation des ondes de choc (avec résolution explicite, et prise en compte d'une équation d'état), et une étape de stabilisation (en formulation standard, avec comportement élasto-plastique) vers l'état résiduel.

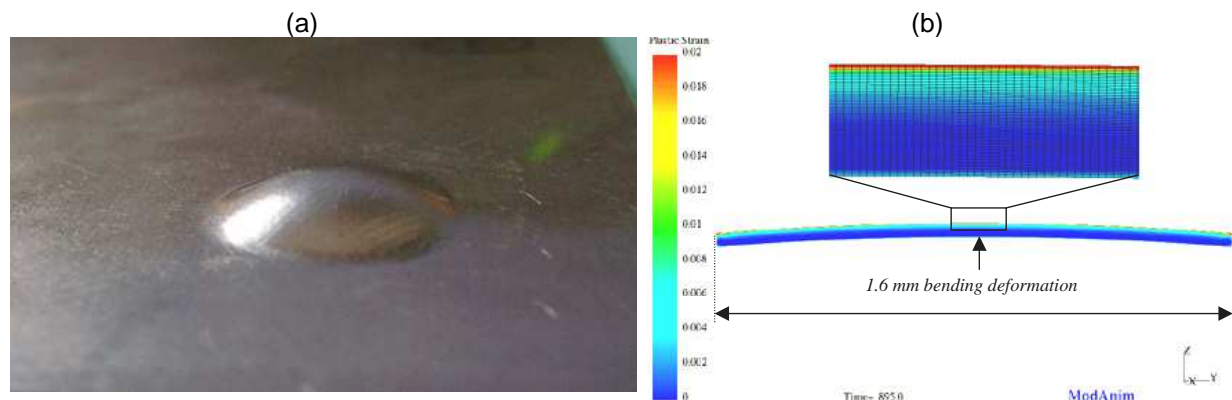
La bonne connaissance du chargement ( $P=f(t)$  déterminé expérimentalement, pas de contact), rend la modélisation plus aisée qu'en grenailage, à condition de connaître le comportement sous choc du matériau, et en particulier sa limite d'élasticité ultradynamique (sous choc plan à  $10^6 \text{ s}^{-1}$ , la limite d'élasticité s'exprime par  $P_H=(1-\nu)/(1-2\nu) \cdot \sigma_Y^{\text{dyn}}$ ). Des études récentes [10] sont allées dans ce sens. Dans ces conditions, l'influence des paramètres opératoires (durée d'impulsion laser, amplitude de pression, impédance du revêtement et de la cible) est correctement décrite (Fig.5).



**Figure 5** : Simulation EF des contraintes résiduelles induites par choc-laser sur acier inoxydable : (a) influence de la durée d'impulsion sur les contraintes en profondeur ( $P=4 \text{ GPa}$ ), (b) comparaison simulation – DRX (1 à 3 impacts de  $20 \text{ GW/cm}^2$  - 3 ns)

## 4. Les applications du procédé

Actuellement, en plus des deux grandes applications recensées pour le procédé (traitement des aubes fan par GE [3,4] depuis 1998 et traitement des joints soudés de REP par Toshiba [5,6] depuis 2000), plusieurs domaines d'applications émergents sont en cours d'étude. C'est le cas du formage par choc-laser ([www.ecoshape.com](http://www.ecoshape.com)) généralement destiné aux structures aéronautiques (Al, Ti), qui présente l'intérêt de mettre en forme des pièces métalliques (jusqu'à 20 mm d'épaisseur), tout en améliorant leur durée de vie (ce que ne font pas les procédés laser par voie thermique, générateurs de contraintes de traction superficielles et d'adoucissements structuraux). Utilisé soit en configuration de matricage (sur un support de géométrie donnée : Fig.6a), soit en configuration de formage classique (avec bridage latéral), le procédé permet de générer des convexités locales ou globales, assez facilement simulables [12] par des codes de calcul usuels (ABAQUS<sup>TM</sup>, Fig.6b : RADIOSS<sup>TM</sup>).



**Figure 6** : formage par choc-laser de structures métalliques : (a) matricage d'une calotte hémisphérique en alliage d'aluminium 7000 par choc-laser, (b) simulation EF (RADIOSS<sup>TM</sup>) du formage d'une éprouvette ALMEN en acier C75 [12]

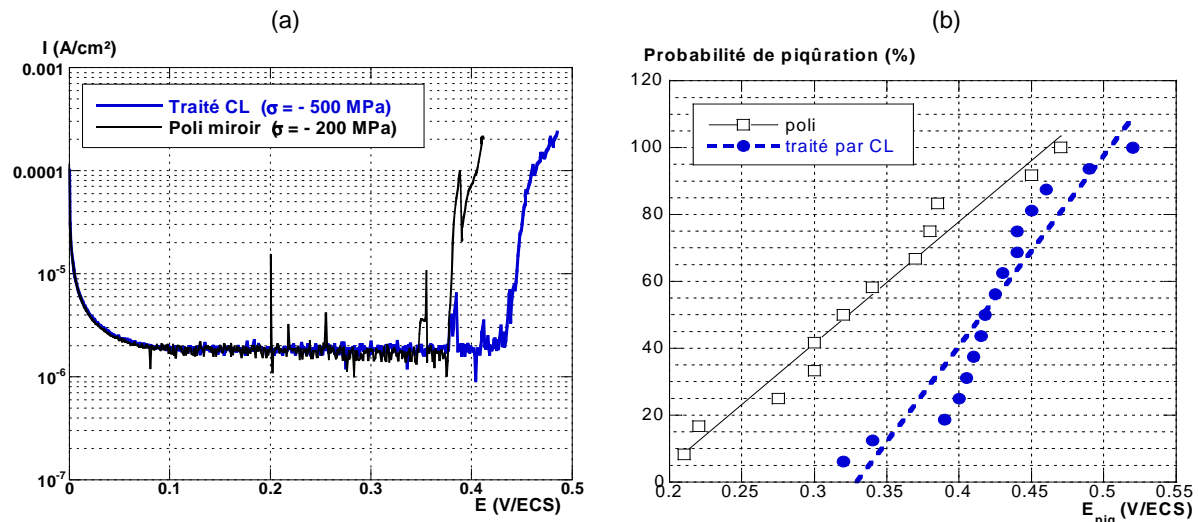
On citera également des études récentes sur l'amélioration de la corrosion localisée par piqûres en milieu salin [11]. Des décalages importants des potentiels de germination de piqûres (+0.1 V : Fig.7) peuvent alors être obtenus après choc-laser sur différents aciers inoxydables (Fe-12Cr-2Mo, 316L), qui ont été attribués à une modification des réactions cathodiques se produisant au niveau du film passif.

La corrélation directe « contraintes résiduelles de compression – propriétés électrochimiques » est toutefois difficile en raison des différences d'échelles mises en jeu (quelques  $\mu\text{m}$  pour la détermination des contraintes de surface par DRX, quelques nm pour la passivité).

De même, le traitement d'aciers de roulement 100Cr6 par choc-laser [13], a permis d'améliorer la résistance à l'usure en condition non lubrifiée, à condition de travailler en dessous d'une pression appliquée de 100 MPa, au delà de laquelle des plastifications répétées viennent accentuer les mécanismes d'usure. Outre cette étude à caractère fondamental, aucune application tribologique n'est recensée à ce jour.

Plus récemment, des études réalisées au Laboratoire LLNL (San Francisco, USA) ont même envisagé de résoudre les problèmes de fragilisation par l'hydrogène grâce à cette technique, sans grand succès [14].

Enfin, on peut ajouter à ces applications « Précontrainte » du choc-laser, une application originale récente, dans lequel le procédé est détourné de son application initiale dans le but de caractériser l'adhérence des revêtements par des décohésions interfaciales sur des ensembles substrat – revêtement. Une information quantitative (en GW/cm<sup>2</sup> ou en contrainte) sur le seuil de rupture dynamique des interfaces permet alors d'en valider la résistance ([www-lasat.clfa.fr](http://www-lasat.clfa.fr)).



**Figure 7 :** Comportement électrochimique dans NaCl 0.5 M – pH 2 : (a) Courbes potentiocinétiques à partir de 0 V/ECS (b) Représentation statistique des potentiels de germination de piqûres [10]

## 5- Conclusion

Le choc-laser a enfin dépassé le stade du laboratoire pour faire son entrée dans le monde industriel, en complément des traitements mécaniques plus traditionnels. L'avènement des nouvelles sources laser et des transports de faisceau par fibres optiques a beaucoup contribué à cet état de fait. Plusieurs applications sont maintenant recensées, et semblent correspondre à des « niches » pour lesquelles les traitements plus classiques présentent des limites. L'utilisation de revêtements thermo-protecteurs reste toutefois une contrainte importante, même si des applications récentes ont montré la possibilité de traiter les surfaces sans les revêtir au préalable. Au niveau de la physique du procédé et des chargements mécaniques induits, la maîtrise est totale. Seule manque encore une simulation numérique 3D des effets du traitement intégrant, par exemple, une description précise de l'influence du taux de recouvrement sur l'homogénéité des états de contraintes résiduelles.

## References

- [1] A.Sollier, "Etude des plasmas générés par interaction laser-matière en régime confiné. Application au traitement des matériaux par choc-laser" *Thèse de l'Université de Versailles St-Quentin*, 24 Septembre 2002
- [2] L.Hackel, C.Brent Dane, F.Harris, J.Rankin, C.Truong, "Transportable laser peening system for field applications to improve fatigue and SCC resistance of offshore components and structures", Actes de la conférence ASME PVP2006-ICPVT-11, Vancouver (Canada), 23-27 Juillet 2006

- [3] M.Azer, D.Scheidt, "The influence of spot overlap and laser fluence on the high cycles fatigue strength of aircraft engine fan blades", *Actes de la conférence ICALEO'2004* (23<sup>rd</sup> International Congress on Lasers and Electro-Optics), San Francisco (USA), Nov 2004
- [4] T.J.Rockstroh, "Cost effective laser shock processing development at GE aircraft engine", *Actes de la conférence ICALEO'2005* (24<sup>th</sup> International Congress on Lasers and Electro-Optics), Miami (USA), Nov 2005
- [5] Y.Sano, K.Akita, K.Masaki, Y.Ochi, I.Altenberger, B.Scholtes, "Laser peening without coating as a surface enhancement technology", *Actes de la Conférence LAMP'2006*, Kyoto, Juin 2006
- [6] Y.Sano, M.Obata, T.Kubo, N.Mukai, M.Yoda, K.Masaki, Y.Ochi, "Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating", *Mat.Sci & Engng. A* **417** (2006), pp 334-340
- [7] P.Prevey, D.Hornbach & P.Mason, "Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components", *Actes de 17<sup>th</sup> Heat Treating Society Conference*, Eds D.L.Milam, ASM, Materials Park, 1998, pp 3-12
- [8] W.Braisted & R.Brockman, "Finite element simulation of laser-shock peening", *Int.J.Fatigue*, **21** (1999), pp 719-724
- [9] K.Ding and L.Ye, "Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes", *Surface Engineering*, 19(5) (2003), pp 351-358
- [10] P.Peyre, A.Sollier, L.Berthe, E.Bartnicki, R.Fabbro, I.Chaieb, C.Braham, "FEM Simulation of residual stresses induced by laser peening", *European Physical Journal : Applied Physics*, **23**, (2003), pp 83-88
- [11] P.Peyre, C.Carboni, P.Forget, G.Béranger and C.Lemaitre, "Influence of surface modifications induced by laser peening on the initiation of corrosion pits in 316L stainless steel", *A paraître*, *Journal of Materials Science*, 2006
- [12] P.Peyre et al., "Finite element modelling of laser-peening and laser peen forming of materials", *Actes de la conférence ICALEO'2004* (San Francisco, USA), Nov 2004
- [13] I.Yakimets, C.Richard, G.Béranger and P.Peyre, "Laser peening processing effect on tribological properties of 100Cr6", *Wear*, **256** (3-4) 2004, pp 311-320
- [14] T.Zaleski, Présentation orale, Conférence ASME PVP2006-ICPVT-11, Vancouver (Canada), 23-37 Juillet 2006