

Le laser en contexte industriel : une palette d'applications étonnantes

*Thierry Engel est professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Strasbourg et responsable du Laboratoire de physique de l'INSA. Il fait partie de l'équipe de recherche Instrumentation et Procédés Photoniques (IPP) de l'UMR iCube CNRS/Université de Strasbourg, iCube¹. Il est conseiller scientifique à l'IREPA LASER² (**Encart : « L'IREPA LASER »**), une structure qui fait le pont entre la recherche sur les lasers et les applications industrielles.*

D'après la conférence de Thierry Engel

1. cube.unistra.fr

2. www.irepa-laser.com

L'IREPA LASER

L'IREPA LASER est une petite structure d'une cinquantaine de personnes qui a pour mission de transférer des recherches vers le développement, à destination de l'industrie dans un domaine d'activité utilisant le laser, principalement le laser de puissance.

Structure et mission

L'IREPA LASER compte environ quarante-cinq salariés et a récemment adopté la structure SCIC, Société Coopérative d'Intérêt Collectif, où chaque salarié apporte une contribution. Elle a connu deux créations de startups : LAP (Laser Alsace Production) pour la découpe matériaux, et BeAM (Be Additive Manufacturing) en 2012 pour la partie ventes et assistance pour l'implantation de machines de création de pièces en 3D.

Sa mission est de développer des solutions innovantes à destination de l'industrie ; elle s'appuie sur un énorme institut, l'Institut Carnot Alsace, qui compte dix-huit laboratoires de recherche et plateformes associées, avec notamment l'Institut de Science de Matériaux de Mulhouse (is2m) et l'Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (ipcms), qui possèdent de nombreux instruments de caractérisation. Les missions concernent l'étude, la conception et l'industrialisation, le conseil et l'expertise, ainsi qu'un gros volet qui concerne la formation de stagiaires. Pour devenir technicien industriel pour le laser, les jeunes peuvent suivre une formation intégrée à l'IREPA LASER en association avec l'INSA. À la sortie, ils auront un travail qui touche au laser industriel.

Domaines d'activité et parc machines

Cinq domaines d'activité à l'origine se sont réduits en quatre (**Figure 1**). **La fabrication additive ; le micro-usinage ; l'assemblage de matériaux**, qui était auparavant dissocié en soudage de matériaux et assemblage de polymères, puisque ce sont des disciplines très différentes, utilisant des lasers très différents aussi ; **un volet sécurité**, particulièrement important (aucun accident n'est arrivé depuis plus de dix ans).



Figure 1

L'IREPA LASER compte cinq domaines d'activité désormais regroupés en quatre : fabrication additive, micro-usinage, soudage de métaux et assemblage de polymères, tous deux désormais regroupés dans le domaine assemblage de matériaux, et sécurité laser.

Du point de vue du matériel, le plus gros laser de l'IREPA est un laser à fibre de chez IPG : 6 kW (**Figure 2**).

L'IREPA dispose aussi d'un laser femtoseconde (impulsions de 300 femtosecondes) et de lasers à diode, principalement pour l'aspect proche infrarouge à la limite du visible. La

particularité aujourd'hui est la multiplication des têtes scanners comprenant des miroirs oscillants qui permettent de décrire une surface quelconque. Enfin, nous caractérisons les pièces obtenues au moyen de divers instruments comme des profilomètres, des appareils (microscopes principalement) qui permettent d'apprécier la topographie de la surface, par exemple comment sont creusés les différents sillons produits sur un matériau, ainsi que la nature des espèces métallographiques.

L'IREPA est active dans quatre grands secteurs (**Figure 3**) : l'aéronautique, avec notamment le soudage de nappes de fibres de carbone ; le médical, avec des structures osseuses remplaçant des os qui ont été endommagés lors d'un accident ; le transport terrestre, avec l'amélioration de la lubrification par des texturations ; le démantèlement de structures, notamment pour les puits de pétrole dans lesquels il s'agit de découper (plutôt que de faire exploser) la base d'un puits de pétrole sans s'occuper des déchets qui restent dans la mer.

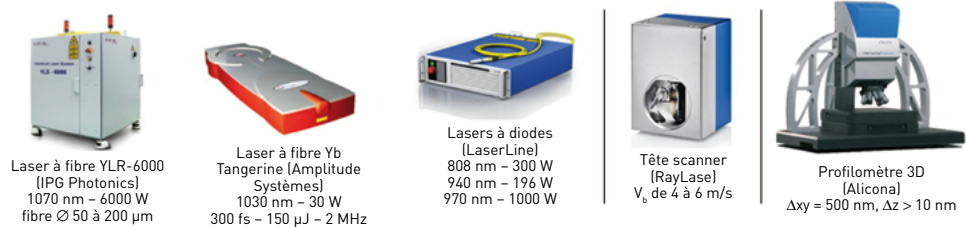


Figure 2

L'IREPA utilise vingt sources laser et équipements associés. Le plus gros laser est un laser à fibre IPG d'une puissance de 6 kW. Un laser d'Amplitude Systèmes est également utilisé pour la texturation de surface avec des impulsions de 300 femtosecondes. Des lasers à diode sont également utilisés avec des têtes scanners. Enfin, des profilomètres sont utilisés afin de relever la topographie de la surface du matériau pour savoir comment sont creusés les différents sillons.



Figure 3

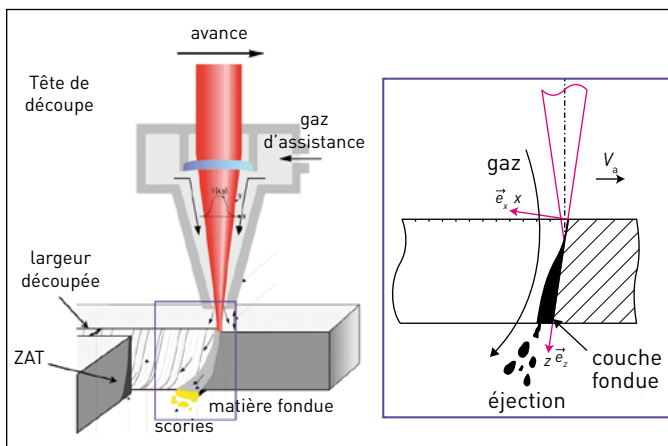
L'IREPA compte quatre grands domaines d'activité : aéronautique, médical, transport terrestre et énergie.

1 La découpe de métaux
 Cette application fait partie des toutes premières applications traitées à l'IREPA LASER en 1982-1984. Il s'agit de la découpe de métaux où l'on veut remplacer les procédés

actuels par une absorption du faisceau dans la partie superficielle des matériaux. On choisit la longueur d'onde du laser en fonction de la faculté d'absorption du matériau ; on fait ensuite progresser l'élément

Figure 4

La découpe laser est l'une des premières applications du laser dans l'industrie. Le faisceau laser est absorbé en partie supérieure, et on assiste ensuite à une fusion localisée de la matière. Cette matière fondue est chassée par de l'air à haute pression et, en parallèle, le déplacement de la tête de découpe permet la découpe du métal.



pour entretenir l'état fondu et obtenir la découpe du matériau (Figure 4).

Dans cette technique, on peut tirer profit de l'exotherme apporté par la fusion par la plupart des métaux. Cela fonctionne bien avec le fer par exemple et avec la plupart des matériaux ferreux ; avec le titane, cela fonctionne également et on peut récupérer une énergie proche d'un méga Joule par mole et apporter ainsi deux à quatre fois la puissance du laser (Figure 5). Avec un laser d'1 kW, on couple ainsi jusqu'à 4 kW d'énergie efficace à la matière. Cela accélère ainsi le procédé.

En pratique, pour assurer l'évacuation du matériau fondu, on place sous la plaque de découpe

un support ajouré, structure qui permet de dégager la matière en fusion pour que le système ne soit pas endommagé par le laser (Figure 6).

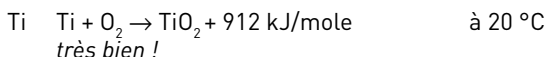
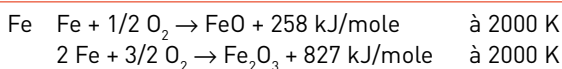
2 La découpe de verre

Une autre application industrielle est la découpe du verre. Le mécanisme commence par une absorption partielle en surface, un échauffement localisé et donc un gradient de température qui génère des contraintes dans la matière. Ces contraintes sont ajustées pour qu'elles dépassent les limites de résistance et provoquent une fissure ;

Figure 5

Il est possible de renforcer le phénomène de découpe et de le rendre plus rapide en utilisant des réactions chimiques exothermiques. Cela permet d'obtenir une énergie allant jusqu'à quatre fois l'énergie du faisceau laser. Ces réactions fonctionnent avec les matériaux contenant du fer (Fe) ou du titane (Ti).

Métaux



inox pas beaucoup d'énergie libérée (passivation)

on continue en déplaçant la plaque (**Figure 7**).

Selon les cas, on va utiliser les lasers à diode de différentes caractéristiques d'intensité transverse ; ce peut être un faisceau Gaussien (profil en forme de cloche), un faisceau plat (profil en forme de couteau) ou en *top hat* (forme en chapeau) (**Figure 8**).

Cette technique de découpe s'effectue à des vitesses importantes qui se chiffrent en mètres par minute, jusqu'à trois mètres par minute environ. Elle s'applique même au verre trempé, qui présente des contraintes internes telles qu'il se casse en mille morceaux sous l'effet d'un choc (**Figures 9-11**).

Les paramètres à ajuster sont la longueur d'onde du laser, qui dépend bien entendu des propriétés optiques du matériau (808 nm sur le cas de la **Figure 10**), sa puissance, le profil du faisceau, la vitesse de déplacement du verre (**Figure 11**). L'opération est compatible avec des trajectoires non linéaires (**Figure 12**).

3 Le soudage métallique

Pour le soudage métallique, on utilise un procédé qui permet d'aller très vite et qu'on appelle *keyhole*.



Figure 6

Il est important d'avoir un support ajouré (entouré en rouge) sous la plaque de découpage afin de pouvoir dégager la matière fondue en évitant l'endommagement par le laser.

D'habitude, on utilise le mode conduction, c'est-à-dire qu'on apporte l'énergie sur la surface, et cette énergie thermique se diffuse dans la matière (**Figure 13**). Cela conduit à des pénétrations faibles, comme on le voit à droite sur une micrographie³, et quelque chose de relativement évasé avec une zone affectée thermiquement relativement importante.

En mode *keyhole*, on règle l'irradiation pour creuser un capillaire que l'on va déplacer (**Figure 14**). Ce procédé permet d'utiliser un régime

3. La micrographie est une méthode d'investigation utilisant le microscope en métallurgie afin de déterminer la composition et la structure d'un métal.

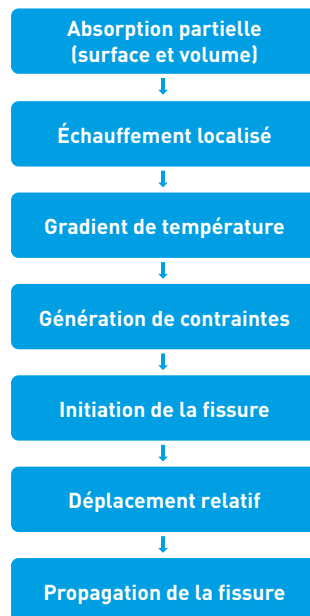
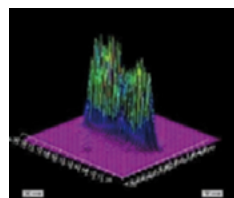
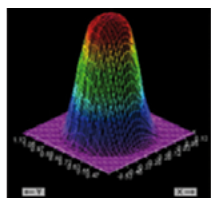


Figure 7

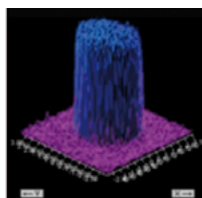
Mécanisme de la découpe du verre par le laser : le faisceau laser provoque une absorption superficielle sur le verre, puis un échauffement localisé. Un gradient de température se crée dans la matière, ce qui génère des contraintes. Il suffit de s'arranger pour que ces contraintes dépassent les limites de résistance, ce qui initie la fissure du matériau. Le déplacement du faisceau laser permet de propager la fissure et d'obtenir le résultat souhaité.



diode 808 nm, 300 W
spot 0,9 × 5,7 mm
 $L_R = 5,5$ mm



diode 940 nm, 200 W
spot 0,44 mm
 $L_R = 1,75$ mm



laser à fibre 1070 nm
6 kW, spot 3,5 mm
 $L_R = 93$ mm

Figure 8

Les faisceaux laser utilisés peuvent avoir différentes formes avec, de droite à gauche : plat, gaussien ou en top hat.

	$\lambda = 808 \text{ nm}$	$\lambda = 940 \text{ nm}$	$\lambda = 1070 \text{ nm}$
Meilleures performances		Vitesse [m/min]	
Sodocalcique 2 mm	3	3,2	3,2
Sodocalcique 6 mm	1,6	2	/
Trempé 5 mm	3	/	/

Figure 9

Vitesses de découpage obtenues pour différents verres avec différents lasers. La vitesse peut atteindre plus de 3 mètres par minute. D'un autre côté, on note que les tests ont été concluants avec du verre trempé. On voit que seul le laser à diode 808 nm a permis de découper du verre trempé d'épaisseur 5 mm : les lasers de longueur d'onde supérieure n'ont pas convenu.

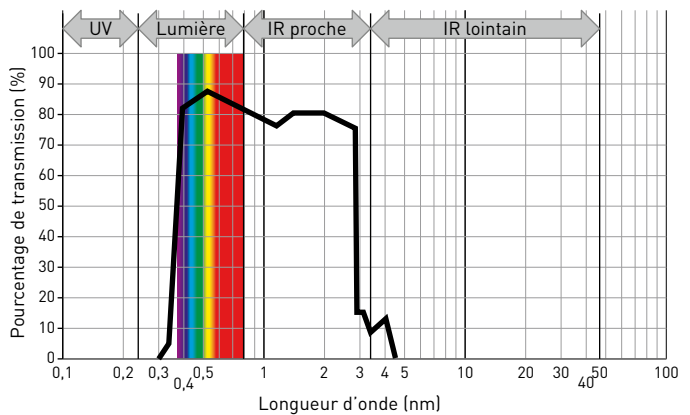


Figure 10

La transmission typique du matériau travaillé est importante à bien connaître. Elle permet de choisir la longueur d'onde de travail du laser, dans ce cas le verre, pour obtenir une absorption suffisante dans le volume, permettant tout à la fois de chauffer et de progresser dans le matériau. Ici, des lasers avec des longueurs d'onde comprises entre 800 et 1 100 nm conviennent bien.

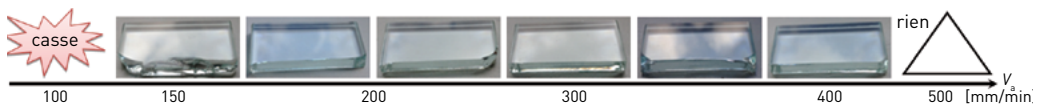


Figure 11

Il est important d'effectuer des tests de vitesse : on voit ici que c'est uniquement à partir d'une certaine vitesse de déplacement du laser qu'il est possible d'effectuer une découpe efficace sans casser le verre.

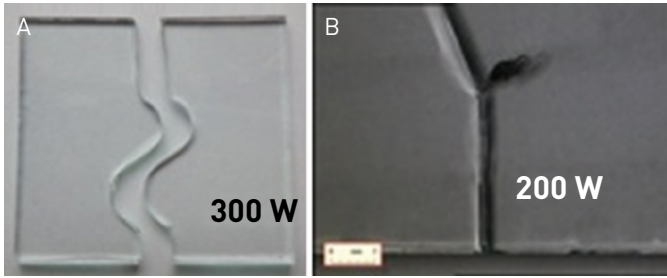


Figure 12

Les tests à 300 W (A) et à 200 W (B) montrent qu'il est possible de découper du verre dans toutes les directions voulues avec un laser. Les résultats pour le laser 300 W sont néanmoins les meilleurs (voir la **Figure 11**).

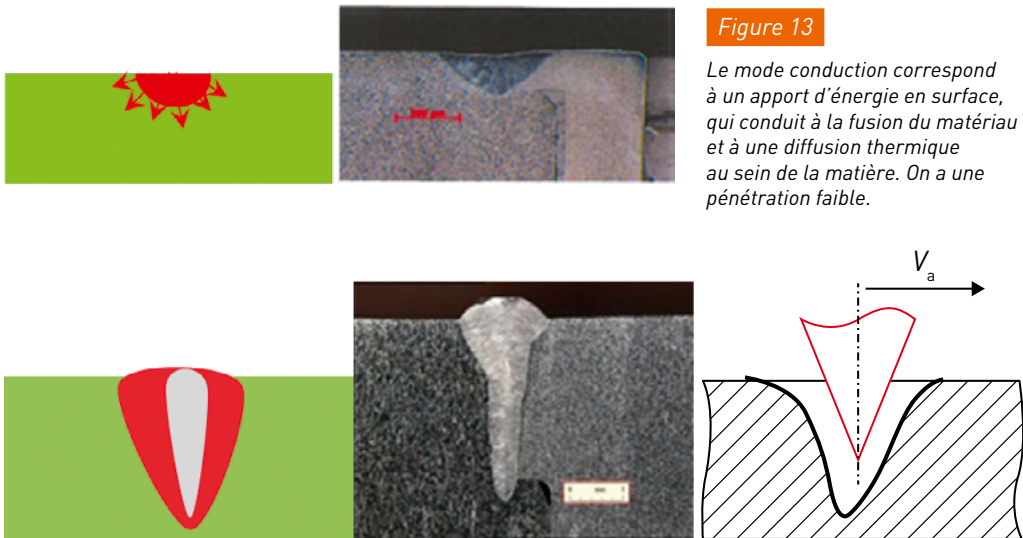


Figure 13

Le mode conduction correspond à un apport d'énergie en surface, qui conduit à la fusion du matériau et à une diffusion thermique au sein de la matière. On a une pénétration faible.

Figure 14

Lors d'un soudage en mode keyhole, l'énergie est apportée sur la surface en forme de capillaire, ce qui permet une plus forte pénétration dans le matériau. Il y a ensuite déplacement du laser, ce qui donne une forme de corne.

où les pressions de vapeur sont en fait les pressions de plasma⁴. Le réglage au sein de la vapeur équilibre les forces plasma, la tension

superficielle⁵ et la gravité. On l'ajuste pour obtenir que le plasma ne décolle pas de la surface, ce qui le rendrait opacifiant et arrêterait l'interaction.

4. Plasma : état de la matière visible sur Terre à haute température lorsque l'énergie est telle qu'il est possible d'arracher des électrons aux atomes. Il est donc facile de concevoir qu'un laser puisse provoquer un état plasma de la matière du fait de sa grande énergie.

5. Tension superficielle : interactions à l'interface entre deux fluides. Par exemple, c'est la tension superficielle qui permet à une pièce de rester à la surface d'un verre d'eau, ou encore aux gerridés de se déplacer à la surface d'une mare.

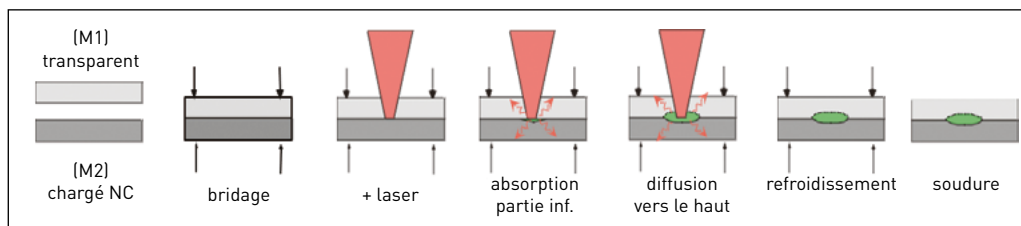


Figure 15

L'assemblage de thermoplastiques s'effectue de la manière suivante : le premier matériau doit être transparent et le deuxième matériau doit être absorbant. De ce fait, le faisceau laser traverse le premier matériau et arrive jusqu'à la surface du second matériau, qui absorbe l'énergie. La chaleur se diffuse ensuite de l'interface vers le bas et vers le haut, ce qui aboutit, après refroidissement, à une soudure.

4 L'assemblage de thermoplastiques

L'assemblage thermoplastique fait directement intervenir la chimie. La situation classique est celle d'un soudage par contact. Cela se réalise grâce à un bridage et l'irradiation par un laser, qui ne voit pas le premier matériau, transparent, mais directement le deuxième

matériau, qui est un polymère absorbant ; la diffusion de la chaleur déposée à l'interface progresse à la fois vers le bas et vers le haut pour aboutir à la soudure recherchée (Figure 15).

Cette technique demande de bien choisir le laser pour qu'il y ait absorption, mais pas trop. Cela se fait à partir des spectres d'absorption (Figure 16 pour l'exemple du PMMA (polyméthacrylate de méthyle) et le styrène) pour ajuster la longueur d'onde, la puissance et la température dans le domaine de fusion (Figure 17) ; cela est réalisé également par l'ajout de noir de carbone dans le polymère inférieur.

La résistance obtenue par cette technique est typiquement celle du matériau de base (le substrat) : environ 50 MPa pour l'alliage PMMA/styrène (Figure 17). L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) que l'on voit sur la Figure 18 montre que le soudage s'est traduit par un entrelacement de fils polymères entre les deux matériaux.

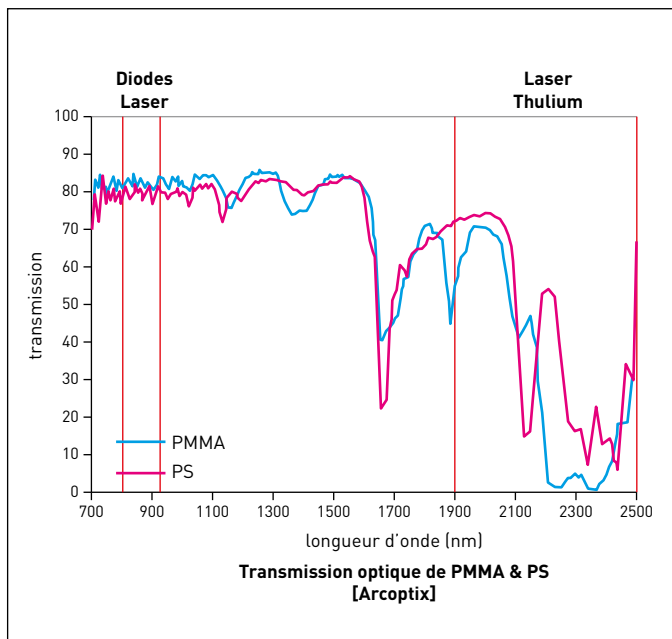


Figure 16

Les courbes de transparence et d'absorption (ici les exemples du PMMA et du polystyrène) des matériaux à assembler permettent de choisir une longueur d'onde de laser appropriée. On choisit le laser pour qu'il y ait suffisamment d'absorption, mais pas trop non plus.

5 Le marquage couleur

Le marquage couleur est une autre application touchant à la chimie, notamment à la

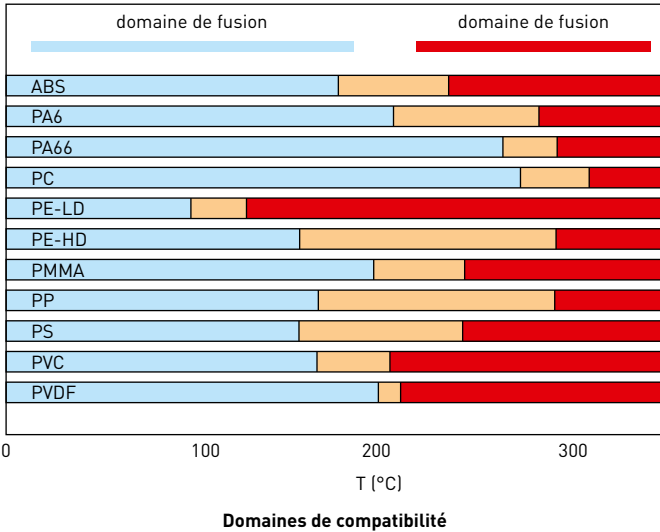


Figure 17

Situation du domaine de fusion pour une série de polymères courants. L'assemblage permet d'augmenter la résistance du matériau en assurant une résistance relativement importante ; en général, on obtient celle du substrat.

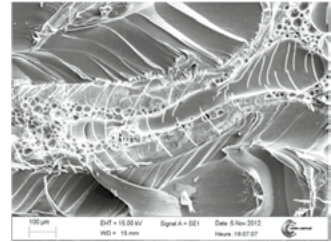


Figure 18

Vue MEB 100 µm sur PA6/PA6NC après traction. Structurellement, le soudage se traduit par des entrelacements de fils polymères entre les deux matériaux.

Source : CETIM-CERMAT.

chimie des colorants. Dans la technique « jet d'encre », on part d'un dépôt de goutte de colorant sur un substrat polymère. On utilise ensuite un laser pour obtenir une diffusion de la couleur dans le substrat (Figure 19).

Il s'agit de réaliser l'absorption d'un faisceau laser par un colorant qui a été ajouté à l'encre, sans toucher au spectre d'absorption de la couleur qui reflète le spectre d'émission. Il s'agit d'un travail de chimiste (Figure 20).

Le réglage n'est pas toujours facile à obtenir, comme on le voit sur la Figure 21. On constate qu'après le passage du laser, on a sur l'ABS une décoloration des pigments, sur le PVC quelque chose de beaucoup plus stable, et enfin quelque chose d'idéal sur le polyéthylène (PET) (Figure 21).

Tout cela se produit relativement vite, à 17,5 cm/s environ. Les couleurs sont formulées pour le laser comme stables et pérennes par fixation laser. Dans l'exemple de la Figure 21, la résolution est d'environ 150 microns.

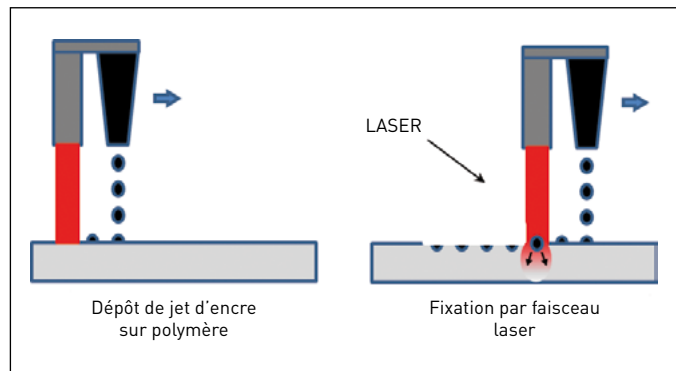


Figure 19

Lors d'un marquage couleur, le jet d'encre est déposé sur polymère, puis un faisceau laser est passé ensuite pour diffuser et fixer la couleur dans le substrat.

Figure 20

Pour une impression laser, il est important de formuler l'encre de sorte à ce que le spectre d'absorption de la couleur ne soit pas touché mais que le spectre soit sensible à la longueur d'onde du laser utilisée. On voit que l'ajout d'un colorant additionnel permet d'avoir un pic d'absorption à la longueur d'onde de travail du laser, soit 808 nm.

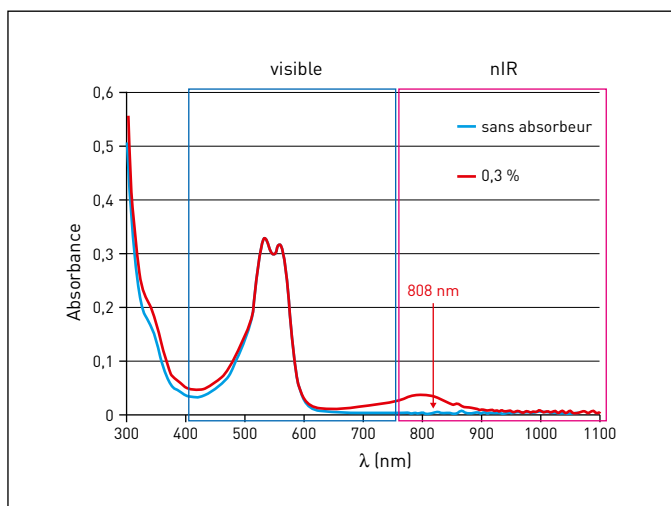
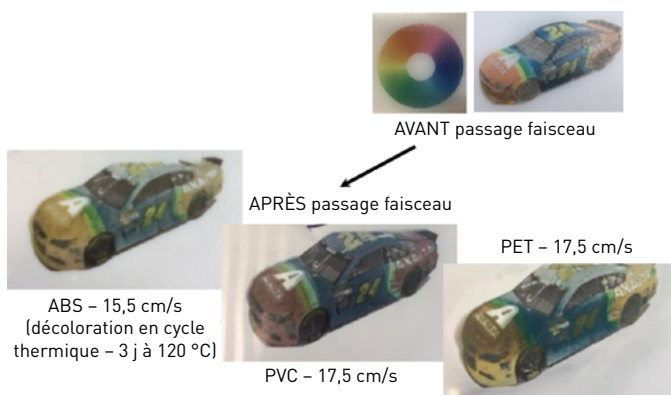


Figure 21

Le polymère utilisé est un facteur à prendre en compte lors du choix d'un marquage couleur. Ici, dans les mêmes conditions, le PET est bien plus performant que l'ABS.



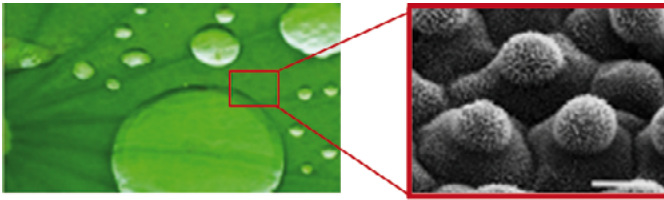
6 Texturation sur métaux

Sur la feuille de lotus ou sur les capucines, les gouttes d'eau perlent et se déversent. Sur ces plantes, l'eau coule et assure son alimentation. Au bout d'un moment, la plante s'ouvre et laisse couler l'eau qui va éliminer la saleté. Elle est ainsi réceptrice de l'eau de façon optimale. Cette propriété est due à l'existence d'une double structure de la feuille marquée de motifs d'environ 10-30 microns, au milieu desquels on voit des petits

picots submicrométriques (Figure 22). L'application de ce principe aux matériaux métalliques est un des grands volets d'étude de l'IREPA LASER.

Le but de la texturation sur métaux est de reproduire ces propriétés inspirées par la nature sur des matériaux métalliques. Cela peut s'effectuer par une irradiation laser bien ajustée – ici par un laser femtoseconde pour ne pas subir d'effet d'accumulation thermique.

Le laser crée un auto-arrangement en surface sous forme d'une structure



Feuille de lotus
(double échelle de rugosité)

Figure 22

La feuille de lotus est un matériau naturellement superhydrophobe. En s'intéressant à sa structure microscopique, il est possible de voir une double structure : des motifs allant entre 10 et 30 microns, mais aussi des petits picots ayant une taille inférieure au micron.

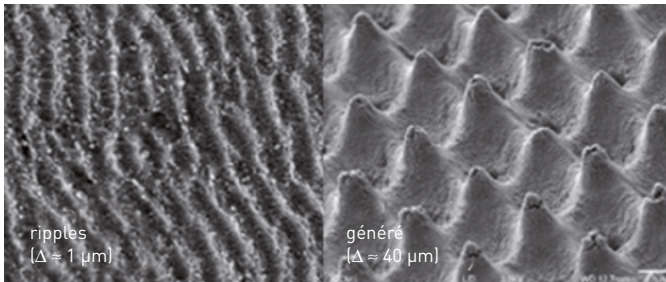


Figure 23

Il est possible avec un laser femtosecondes de reproduire les motifs présents sur la feuille de lotus afin de rendre un métal superhydrophobe. Une structure avec un pas spatial de 40 microns est générée, et comme l'arrangement de la structure du métal en surface est de type nanométrique, les deux conditions peuvent être réunies.

nanométrique. Par balayage, on génère une structure à plus grande échelle (micrométrique), d'un pas spatial de l'ordre de 40 microns. L'association des deux permet de repousser l'eau, donc d'avoir un effet superhydrophobe (Figure 23).

L'intérêt de la durée femtoseconde de l'impulsion laser est d'éviter l'accumulation thermique. Cependant, quand on rapproche les impulsions – par exemple en travaillant au-delà de 250 kHz –, on observe tout de même un effet de cumul

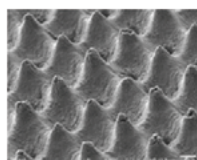
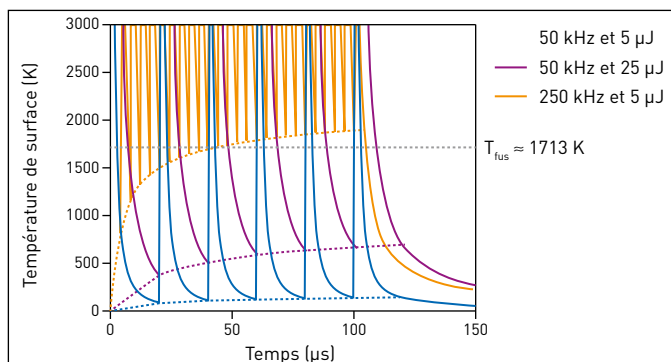
thermique nuisible qui se traduit par une migration d'oxyde et limite la vitesse à laquelle on peut tirer sur ce genre de matériaux (Figure 24).

La Figure 25 montre les résultats obtenus sur de l'inco et sur de l'acier. On voit les gouttes déposées sur de l'inco traité par texturation laser. L'acier pose d'autres problèmes. C'est un matériau composite qui comporte beaucoup d'éléments d'addition. Des oxydes se déposent sur la surface et peuvent faire évoluer la faculté à repousser l'eau. Cet effet

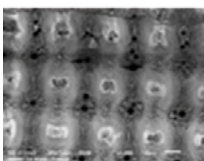
Figure 24

Avec un laser femtosecondes, il n'y a normalement pas d'accumulation thermique. Néanmoins, si les impulsions sont trop rapprochées, il peut y avoir un cumul thermique qui peut entraîner une migration d'oxyde. Cet effet limite la vitesse à laquelle il est possible de réaliser de telles structures sur ces matériaux.

Source : Weber et coll. (2014).



inox 316L
 $\Delta = 40 \mu\text{m}$



acier 40CMD8S
 $\Delta = 40 \mu\text{m}$

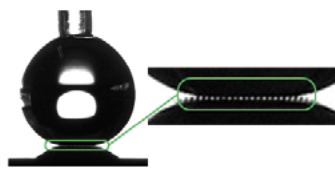


Figure 25

À gauche, la structure microscopique de l'inox et de l'acier traités avec une double structure. À droite, des gouttes d'eau déposées sur la matière traitée qui sont repoussées.

fait aujourd'hui l'objet d'études spécifiques.

Le passage du régime hydrophile aux régimes hydrophobe et superhydrophobe demande un certain temps appelé maturation, phénomène chimique nécessaire à la stabilisation des oxydes des matériaux (Figure 26).

7 La métallisation

La métallisation, le dépôt de couches métalliques sur n'importe quelle surface (par exemple sur une surface isolante), donne accès à de multiples applications. Cette opération peut être réalisée

par irradiation laser. Pour ce faire, une onde de choc est créée par un laser qui provoque un transfert de matière, matière métallique généralement, vers un substrat. Dans de nombreuses applications, ce substrat est un isolant (Figure 27).

La Figure 28 présente quelques réalisations phares : antennes RFID par dépôt, écritures sur isolants (exemple du logo IREPA LASER), dépôt d'aluminium sur PET. On dépose de fait aussi bien du cuivre que de l'aluminium, ou que n'importe quel matériau métallique.

La Figure 29 représente un petit clavier numérique réalisé sur du tissu par métallisation

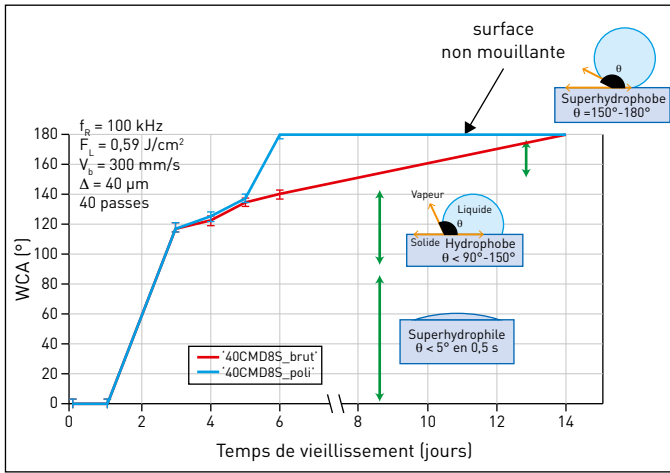


Figure 26

La propriété de superhydrophobie s'applique sur le matériau traité uniquement au bout de plusieurs jours : c'est la maturation du matériau, phénomène purement chimique. L'état de surface du matériau peut aussi avoir une influence sur la durée de maturation : ici, un acier poli (courbe bleue) atteint la maturation au bout de six jours, alors que ce même acier de surface brute met un peu plus de dix jours.

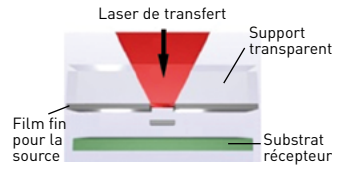


Figure 27

Principe de la métallisation : une onde de choc est créée par le laser, qui résulte en un transfert de matière, généralement métallique, vers le substrat.

Figure 28

Il est possible de déposer quasiment n'importe quel matériau métallique sur n'importe quel substrat : de gauche à droite : une Antenne RFID sur verre, de l'aluminium sur silicium, de l'aluminium sur PET et du cuivre sur du verre sodocalcique.

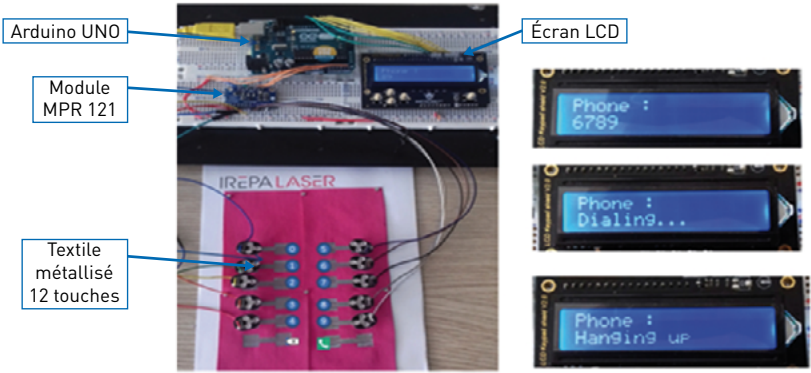
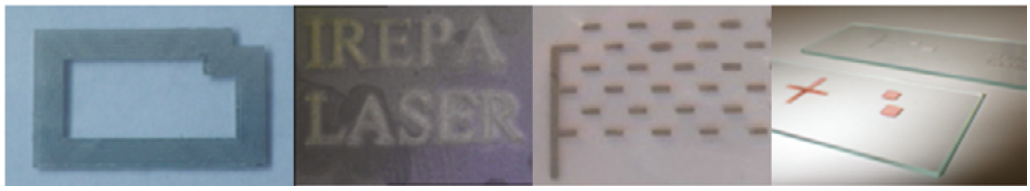


Figure 29

Pour illustrer le fait qu'il soit possible de métalliser des surfaces totalement isolantes, il a été possible de métalliser un tissu pour en faire un clavier de téléphone textile.

pour créer des contacts sur une surface non conductrice. La résolution est d'environ 250 microns.

8 La fabrication additive

Une application phare, développée à l'IREPA LASER, est la fabrication additive, appelée CLAD™ (Construction LASER Additive Directe) (*Figure 30*). Différentes techniques existent, par exemple la technique SLM, qui part d'un dépôt de poudres dans lequel on vient balayer avec un laser. La technique de l'IREPA utilise une buse comportant un faisceau laser, qui vient préchauffer des poudres arrivant coaxialement par un orifice circulaire. Les poudres métalliques ont une granulométrie comprise entre 50 et 90 microns. Le nuage formé par celles-ci est relativement transparent et permet le passage partiel du faisceau laser, chauffant à la fois les poudres

le long de leur trajet et le substrat. On réussit actuellement à déposer une épaisseur de 1 à 2 mm par passage.

Cette technique a été appliquée dans un projet de grande envergure, AMAZE, où il a été fabriqué un cylindre de 50 cm de hauteur et de 60 cm de diamètre (*Figure 31*). La durée de construction a été de 155 heures – pratiquement une semaine, jour et nuit –, la masse déposée a été de 71 kg, avec un rendement d'environ 65 %.

Avant de fabriquer des pièces qui vont demander environ une semaine pour leur construction, il vaut mieux savoir ce qu'on fait notamment pour éviter des défauts (craquelures, fissurations). Ce travail fait actuellement l'objet de simulations numériques thermo-mécaniques (*Figure 32*).

Un dispositif optique avec émission d'un laser sonde et rétrodiffusion par les poudres

Figure 30

La construction laser additive directe (CLAD™) utilise une buse comportant un faisceau laser qui vient préchauffer des poudres arrivant coaxialement par un orifice circulaire. Le nuage formé, peu dense, permet au laser de chauffer aussi le substrat. Les poudres viennent ainsi s'agglomérer au bain fondu, constituant de fait le dépôt.

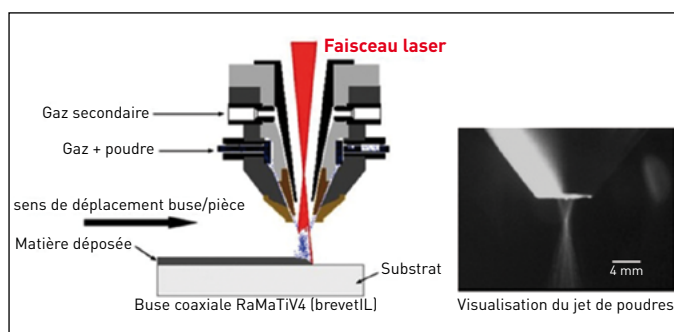


Figure 31

Dans le cadre du projet AMAZE, l'IREPA LASER a fabriqué avec la technique de fabrication additive un cylindre de 50 cm de hauteur et de 60 cm de diamètre, en 155 heures.

Matière	Ti-6Al-4V
Durée de construction	155 h
Temps de simulation	48 h
Masse déposée (Ti6Al4V)	71 kg
Masse utilisée	109 kg
Rendement de dépôt	65 %
Débit	92 cm ³ /h

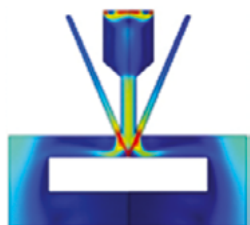


Figure 32

Première modélisation en dynamique des fluides chargés (FEMLab 2005).

NB : cette modélisation a été faite pour dimensionner le jet de poudre. La simulation du cylindre est quelque chose de différent et a été faite bien plus récemment (2017).

permet de suivre la quantité de poudre déposée (Figure 33).

À partir d'une autre caméra placée coaxialement à la buse, on peut visualiser l'isotherme de fusion ($\approx 1\ 500\ ^\circ\text{C}$) et ainsi voir que le procédé n'est pas stable mais évolue en permanence avec des petites zones fondues qui changent en longueur et un peu en largeur. Les simulations nous permettent de garantir que ce qu'on va construire est conforme à l'objectif ; pour l'instant, on applique des simulations thermiques mais on projette de faire des simulations thermomécaniques (thèse en cours à l'IREPA LASER).

9 Mesures et contrôles

La préoccupation « mesures et contrôles » est importante car on ne peut pas pérenniser un procédé industriel sans avoir vérifié que tout se passait bien. Certains contrôles



Figure 33

Un dispositif optique avec émission d'un laser sonde et rétrodiffusion par les poudres permet de suivre la quantité de poudre déposée.

Source : PHOTONLINES.

interviennent avant le procédé – comme celui de la distribution d'intensité du faisceau laser ou de sa distribution temporelle pour être certain de l'énergie que l'on dépose dans la pièce –, d'autres s'opèrent pendant le procédé, comme celui décrit maintenant (Figure 34).

À l'arrivée du faisceau laser, il se produit une interaction avec la matière (ici, une interaction de soudage) et une série d'émissions diverses provenant de l'interaction lumière/matière. On récupère les émissions optiques que l'on sépare en longueurs d'onde : la partie température sera donnée par le proche infrarouge, la partie plasma par l'UV et la partie réflexion, qui rend compte d'un défaut éventuel de la pièce, par la partie visible.

La Figure 35 donne un exemple de résultats d'analyse des spectres d'émission, permettant de distinguer la présence involontaire d'un ruban de scotch sur l'échantillon.

Figure 34

Certains contrôles sont mis en place directement pendant le procédé afin de garantir la qualité de fabrication. Le faisceau laser émet de nombreuses choses du fait de l'interaction lumière/matière. La partie optique de ces émissions est filtrée et divisée en longueur d'ondes puis analysée.

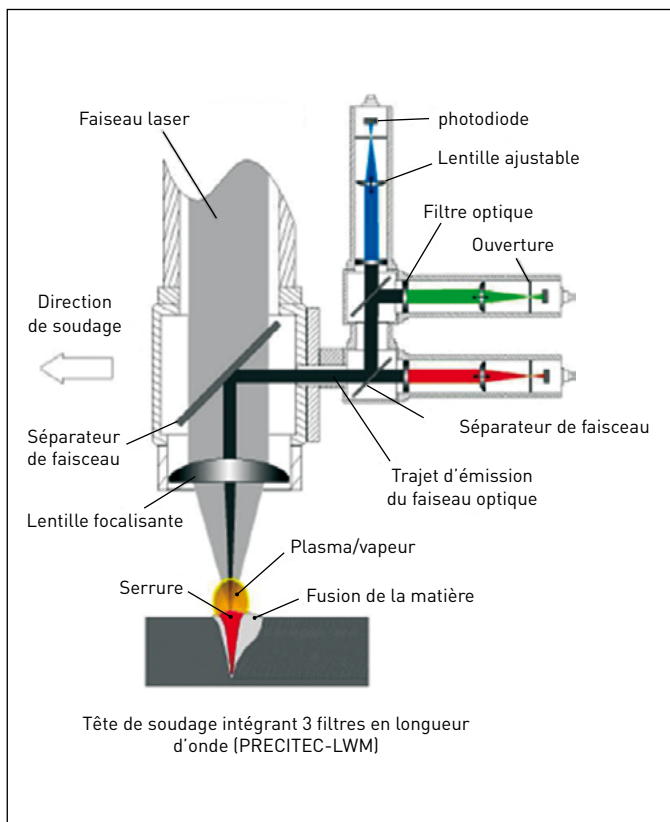
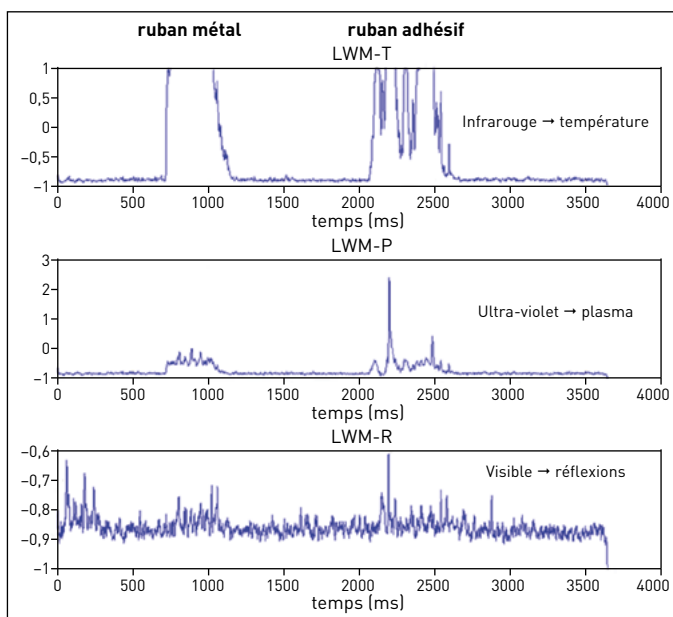


Figure 35

L'étude des spectres d'émission a posteriori permet d'analyser et de comprendre les erreurs de manipulations réalisées. Dans ce cas-là, il est possible de voir qu'un ruban de scotch a été mis par erreur car il y a de grandes modifications du spectre IR (température) et UV (plasma).



Le laser, une palette d'applications

Les applications industrielles des lasers sont innombrables. Seules quelques-unes, en particulier à caractère chimique, ont été abordées dans ce chapitre (rassemblées sur la **Figure 36**).

Notons quelques applications non explicitées plus haut avec la texturation de pneus de vélos pour améliorer le coefficient de pénétration dans l'air qui nous satisfait tout particulièrement puisque l'équipe qui a joué avec ce pneu a gagné. On note aussi le stellitage⁶ de soupape sur des moteurs automobiles qui permet de reconditionner les matériaux plutôt que de les remplacer (c'est un élément de réponse à la consommation effrénée des matériaux). On note encore une machine à placement fibres de carbone utilisée en aéronautique avec des vitesses phénoménales de vingt mètres par seconde ; un laser de 12 kW utilisant des diodes réparties sur plusieurs longueurs d'onde permet ainsi de souder une largeur de 20 cm à cette vitesse. Voici encore la « peau de requin », imitée par texturation, qui permet à des matériaux d'avoir les coefficients de pénétration dans l'eau les meilleurs : un exemple de bio-inspiration par le champion du meilleur Cx dans l'eau. Il y a aussi le « noir profond », réalisé par texturation sur inox, qui réalise une absorption optique d'environ 96 % entre 0,4 à 0,9 microns, bien adapté aux captations d'énergie solaire. Autre application : la refusion de verre par laser qui permet de lisser les défauts rencontrés sur la surface ; elle est ou sera appréciée de tous les utilisateurs de Smartphones.

Une remarque encore à l'intention des jeunes : un laser est un instrument extrêmement éner-

6. Stellitage : plaquage du stellite sur un objet métallique. Le stellite est un alliage métallique dont l'élément principal est le cobalt et l'élément d'alliage principal est le chrome. Le stellite a été une amélioration majeure dans la production de sièges de soupape.

gétique et extrêmement directif. On voit au bas de la **Figure 36** la trace de l'éblouissement laser obtenu à 22 km, dans un cockpit d'avion par un simple pointeur. En raison de sa dangerosité, la Suisse vient d'interdire tout passage de pointeur laser sur son territoire. Bien évidemment, le département sécurité de l'IREPA LASER forme son personnel et les industriels au respect des normes, et cela prend tout son sens lorsqu'on parle de lasers de puissances.

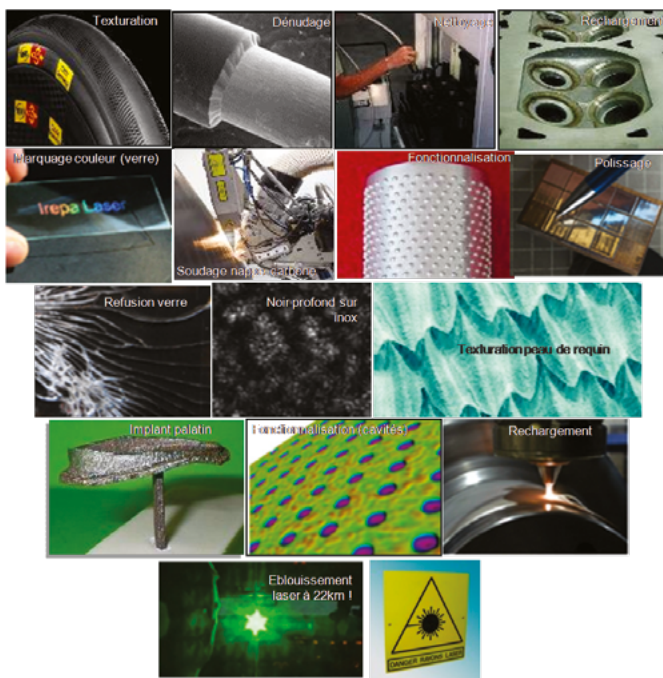


Figure 36

Le laser comporte une palette d'applications infinie : de la texturation du pneu de vélo, au marquage couleur, en passant par le biomimétisme, à la réparation de téléphones, ou encore la médecine.