

# Impact de la modification de la surface d'un acier inoxydable sur la résistance à la corrosion

La modification laser de la surface des aciers inoxydables, qu'il s'agisse de décapage ou de texturation, constitue une alternative pertinente aux procédés traditionnels, avec des performances variables selon la nuance d'acier inoxydable et les paramètres de laser utilisés. Nos résultats démontrent que les procédés laser peuvent améliorer ou ajuster sélectivement les propriétés des aciers inoxydables comme la résistance à la corrosion, mais que les performances finales nécessitent une optimisation fine des paramètres en fonction de la nuance et de l'application visée.

Jorge Arturo Soto Puente, David Plelan, Cyril Fayolle, Pierre-François Cardey,  
Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM)

## 1. CONTEXTE

Une concentration relativement élevée de chrome permet aux aciers inoxydables de former une couche passive d'oxyde de chrome de très faible épaisseur (de l'ordre de quelques nanomètres). Les conditions environnementales (humidité relative ou immersion, présence d'oxygène ou pH) ainsi que l'état de surface de l'acier (impuretés, rugosité) ont un impact sur la formation de la couche de passivation. Les propriétés de cette couche, notamment en termes de résistance à la corrosion, sont également altérées par les procédés subis par l'acier inoxydable comme l'assemblage par soudure ou les traitements thermiques.

Lors des procédés de soudage, des oxydes colorés sont parfois formés à la surface du cordon de soudure et des

zones affectées thermiquement (ZAT). Ces oxydes sont principalement fonction de deux paramètres : la température et la teneur en oxygène. Ils apparaissent du fait que les zones en aval de la torche de soudure ne sont plus protégées par le gaz de protection tout en restant à des températures au-delà de 200°C<sup>[1]</sup>. Le gradient de couleur observé est proportionnel à l'épaisseur de cette couche d'oxyde.

La présence d'une telle zone provoque une altération de la tenue en corrosion du matériau en dégradant la couche passive de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> au profit des oxydes de fer. Il est donc nécessaire d'appliquer un traitement de décapage pour rétablir une couche riche en chrome et par conséquent, améliorer la résistance à la corrosion.

La technologie laser consiste à concentrer une quantité importante d'énergie sur un faisceau qui peut être continu ou pulsé. Pour les lasers avec des impulsions, la durée de chaque impulsion est une caractéristique du laser et a un impact sur les phénomènes d'interaction lumière-matière. Comme décrit dans la Figure 1, lorsque la durée d'impulsion est supérieure à la nanoseconde, l'ablation de matière (pollutions superficielles, oxydes) est accompagnée d'une large zone affectée thermiquement. De plus, autour de la zone d'impact, des débris peuvent se resolidifier<sup>[2]</sup>. En revanche, des impulsions ultra-courtes, de l'ordre de la femtoseconde, limitent l'étendue de la zone affectée thermiquement.

À noter que les surfaces modifiées par le laser peuvent aussi être fonctionnelles : superhydrophobes, auto-nettoyantes, antiadhérentes ou apportant des performances tribologiques.

Par ailleurs, d'après la littérature, le potentiel de piqûre des aciers inoxydables est directement lié à leur PREN (Pitting Resistance Equivalent Number, ou nombre équivalent de résistance aux piqûres) (Figure 2), et la microstructure a également un impact puisque les aciers ferritiques comme le 430 (1.4016) ont des valeurs de potentiel de piqûre nettement inférieures aux grades austénitiques comme le 304L et le 316L. Il est donc important de s'assurer que la tenue à la corrosion de diverses nuances est maintenue lorsqu'une nouvelle méthode de décapage est étudiée.

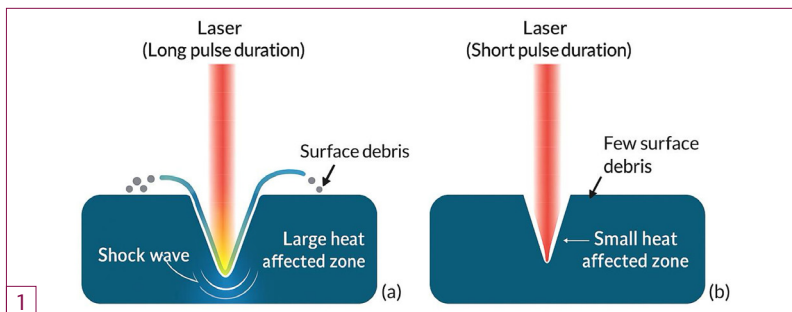


Figure 1. Effet de la durée d'impulsion sur l'interaction laser-matière, a) laser nanoseconde et b) laser femtoseconde.

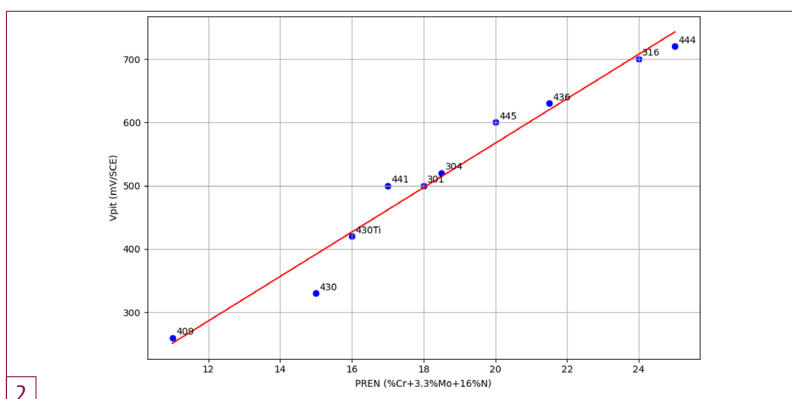


Figure 2 : Potentiel de piqûre des aciers inoxydables en fonction du PREN dans une solution 0.02 M NaCl à 23°C et pH=6.6. Valeurs issues de<sup>[3]</sup>.

Le CETIM a récemment mené des études visant à :

- Évaluer la capacité d'un laser nanoseconde à effectuer le traitement de décapage des soudures en acier inoxydable austénitique pour deux nuances différentes.
- Améliorer la résistance à la corrosion par piqûre de trois nuances d'aciers inoxydables par la texturation de leur surface avec un laser femtoseconde.

## 2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Les matériaux étudiés sont des aciers inoxydables de différentes nuances (Tableau 1).

Pour l'étude sur le décapage, un équipement Clean Laser CL100 avec une longueur d'onde Nd:YAG 1064 nm d'une puissance de 100 W, une lentille 330 mm et un recouvrement XY de 50 % a été utilisé. Deux passes en pattern croisé ont été effectuées, la première avec une fluence d'environ 10 J/cm<sup>2</sup> (suppression des oxydes liés à la soudure) et la deuxième avec une fluence d'environ 5 J/cm<sup>2</sup> (enlever les oxydes grisâtres produits par la première passe).

Ce décapage laser a été comparé en tant que méthode physique alternative aux décapages chimiques et mécaniques (voir Tableau 2) pour l'élimination des oxydes colorés formés après soudage TIG (tungsten inert gas) sur aciers inoxydables 304L et 316L.

Il est important de préciser qu'aucune étape spécifique de passivation chimique n'a été effectuée à l'issue de ces décapages. Ainsi, les échantillons décapés ont été conservés dans une salle climatisée à température contrôlée de 20°C pendant une durée minimale de 15 jours avant de réaliser toute mesure : rugosité ou essais électrochimiques. L'objectif était d'obtenir une passivation naturelle de l'ensemble des échantillons dans des conditions identiques.

Concernant l'étude de texturation, un laser femtoseconde TANGOR de marque AMPLITUDE a été utilisé et plusieurs jeux de paramètres ont permis d'obtenir une douzaine de configurations avec une lentille focale 170 ou 340 mm, des fréquences d'impulsion entre 2 et 200 kHz, une puissance entre 0,07 et 7,73 W, un nombre de passes variable entre 2 et 10 et un recouvrement entre 10 et 30 µm (Tableau 3). Plusieurs nuances d'acier inoxydable de PREN différents (Tableau 1) ont été texturés : 304L, 316L, 904L.

Dans le cas spécifique de la texturation des trois nuances d'acier inoxydable (304L, 316L et 904L), un mode spécifique du laser appelé « burst » a été appliqué pour les configurations du Tableau 4. Ce mode consiste à appliquer la même énergie sur la matière qu'un pulse unique de durée plus longue mais en plusieurs impulsions plus courtes et moins énergétiques.

Pour évaluer la qualité du décapage et de la texturation, des observations au microscope digital Keyence VHX7000 (Tableau 5) et au microscope électronique à balayage Supra 25 de Zeiss (MEB) couplé d'une sonde EDS Bruker AXS, des mesures de rugosité (pour l'étude de décapage), des analyses par spectrométrie photo électronique X (XPS) PHI Quantera SXM et des mesures électrochimiques (potentiostat multivoie Orignalys) ont été effectuées.

	AISI 304L (1.4307)	AISI 316L (1.4404)	AISI 904L (1.4939)
Carbone %	≤ 0,03	≤ 0,03	0,013 ± 0,001
Manganèse %	≤ 2,00	≤ 2,00	1,40 ± 0,04
Silicium %	≤ 1,00	≤ 1,00	0,36 ± 0,03
Soufre %	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,005
Phosphore %	≤ 0,045	≤ 0,045	0,025 ± 0,003
Nickel %	8,0 – 10,5	10,0 – 13,0	24,74 ± 0,38
Chrome %	17,5 – 19,5	16,5 – 18,5	20,25 ± 0,43
Molybdène %	/	2,00 – 2,50	4,31 ± 0,07
Cuivre %	/	/	1,34 ± 0,01
Azote %	≤ 0,10	≤ 0,10	0,064 ± 0,007
Fer %	Cplmt à 100 %	Cplmt à 100 %	Cplmt à 100 %
PREN	17,5 – 21,1	23,1 – 28,5	36,4

Tableau 1. Nuance et compositions des aciers inoxydables étudiés.

Configuration	Moyen de décapage	Mise en œuvre	Type de décapage
A	Brut de soudage	N/A	N/A
B	HNO <sub>3</sub> + HF selon ASTM A380	Immersion	Chimique
C	Gel de décapage (Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> + HNO <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> HF <sub>2</sub> )	Coton/Pinceau	Chimique
D	Bain sans acide nitrique (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + FeSO <sub>4</sub> + HF + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	Immersion	Chimique
E	Brosse à main à fil ondulé acier inoxydable	Brossage manuel	Mécanique*
F	Brosse à main à fil ondulé laiton	Brossage manuel	Mécanique*
G	Brossage à ailettes Gr 320	Brosse rotative	Mécanique*
G'	Brossage à ailettes Gr120 suivi d'un brossage à ailettes Gr320	Brosse rotative	Mécanique*
H	µ-billage à sec	Projection	Mécanique*
I	µ-billage humide	Projection	Mécanique*
J	Tampon abrasif	Brossage manuel	Mécanique*
K	LASER	Ablation	Physique
L	Gel de décapage (HNO <sub>3</sub> + HF)	Pulvérisation	Chimique
M	Décapage par procédé électrochimique (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Pinceau	Chimique
N	Brosse abrasive circulaire en nylon	Brosse rotative	Mécanique
O	Fil ondulé en acier inoxydable rotatif	Brosse rotative	Mécanique
BASE	Métal de base		N/A

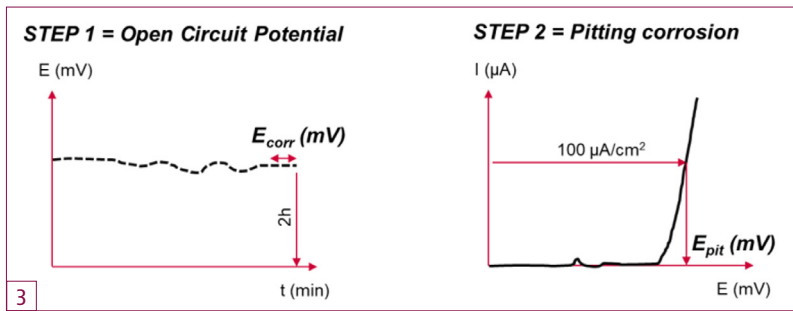
Tableau 2. Méthodes de décapage investiguées.

Configuration	Lentille (mm)	Fréquence (kHz)	Puissance (W)	Nb de passages	Overlap (µm)	Temps /cm <sup>2</sup>
T-A	170	200	7,73	2	10	12 s
T-B				6		36 s
T-C				4	30	4 s
T-D				10		10 s
T-E				2	10	16 min 40 s
T-F	2	0,07	0,07	6	30	50 min
T-G				4		3 min 43 s
T-H				10	9 min 20 s	
T-I				2	10	20 s
T-J	340	100	1,76	6	10	1 min
T-K				4		5 s
T-L				10	30	12 s

Tableau 3. Jeux de paramètres de laser femtoseconde pour la texturation de l'acier 304L.

Configuration	Lentille (mm)	Fréquence (kHz)	Puissance (W)	Δx (µm)	Δy (µm)	Burst	Nb de passages	Temps/cm <sup>2</sup>
A'''	340	400	77,3	10	5	5	2	26 s
B'''	340	400	77,3	10	5	5	2	28 s
(= A''' + LIPSS)								
C'''	340	400	77,3	10	5	50	6	1 min 29 s
D'''	340	400	77,3	10	5	50	6	1 min 31 s
(= C''' + LIPSS)								
E'''	340	100	8,9	3	3	1	2	7 min 48 s
F'''	340	250	7,9	3	3	1	2	3 min 13 s

Tableau 4. Jeux de paramètres de laser femtoseconde pour la texturation de l'acier 304L avec le mode « burst ».



**Figure 3.** Paramètres issus des courbes expérimentales de corrosion.

Ces dernières permettent d'évaluer le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ) et le potentiel de piqûre ( $E_{pit}$ ) d'un matériau dans un électrolyte donné. Dans notre cas, les mesures ont été effectuées dans une solution d'eau de mer synthétique (préparée suivant la norme ASTM D1141-98) aérée/désaérée à une température de 25°C. Etant donné que l'acier inoxydable 904L présente une résistance à la corrosion plus importante que les autres nuances étudiées, il est nécessaire de rendre l'environnement plus sévérant afin de provoquer la corrosion par piqûres. Cela peut être fait en augmentant la concentration de chlorures ou en augmentant la température de l'électrolyte (dans notre cas l'eau de mer synthétique). Les essais électrochimiques pour la nuance 904L ont été effectués à 25, 40 et 60°C.

Pour chaque système (nuance, traitement de surface), cinq échantillons identiques ont été étudiés. Une épargne (vernis et scotch) a été utilisée pour n'exposer que la surface d'intérêt, soit la soudure et la ZAT de chaque échantillon pour l'étude sur le décapage ou la zone texturée pour la deuxième étude. Après immersion des échantillons dans l'électrolyte et en utilisant une

**Tableau 5.** Cordons de soudure des inoxydables austénitiques avant et après décapage.

Nuance	Avant décapage (config. A)	Après décapage chimique suivant ASTM A380 (config. B)	Après décapage laser (config. K)
304L			
316L			

électrode de référence au calomel saturé (ECS) et un potentiostat (Orignalys / Gamry / Biologic...), les paramètres suivants sont obtenus (voir Figure 3):

- $E_{corr}$ : Après 2 h d'immersion en circuit ouvert, cette valeur est obtenue en moyennant les valeurs des 30 derniers points (dernière minute de mesure) en absence de fluctuation.
- $E_{pit}$ : Cette valeur moyenne est déterminée à partir de la courbe de polarisation potentiodynamique. Elle correspond au potentiel auquel la couche passive ne suffit plus et que la corrosion par piqûres s'initie, entraînant une augmentation brusque du courant. Graphiquement,  $E_{pit}$  est déterminé lorsqu'une densité de courant fixe est atteinte (généralement entre 10 et 100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Dans cette étude, les valeurs sont prises à 100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Par souci de clarté, seules les configurations utiles à la discussion sont illustrées dans cet article.

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Alternative au décapage

##### 3.1.1. Aspect visuel après décapage laser

Par rapport à la surface à l'état brut (Tableau 5, gauche), les cordons de soudures décapés par le laser (Tableau 5, droite) ne présentent aucune coloration résiduelle avec un aspect gris clair et homogène, aspect comparable à ceux décapés par une méthode de référence (Tableau 5, centre).

##### 3.1.2. Effets sur la rugosité

En comparaison aux méthodes de décapages mécaniques, les méthodes chimiques et le décapage laser ont très peu d'impact sur la topographie de la surface traitée (voir Tableau 5). Les mesures de rugosité effectuées sur différentes zones du cordon de soudure (ZAT et métal de base) permettent d'affirmer qu'aucune augmentation significative en termes de  $R_a$  (rugosité moyenne arithmétique) ou  $R_z$  (rugosité maximale) n'est observée. À titre d'exemple, les brossages fil (config. E et F) génèrent des stries profondes et les microbillages, principalement à sec (config. H), provoquent des niveaux de rugosité très élevés. Cela a un impact non négligeable sur l'homogénéité de la couche de passivation qui sera présente à la surface de l'acier inoxydable.

##### 3.1.3. Analyse chimique de la surface et de la couche de passivation

Les images MEB (Figure 4, gauche) montrent clairement la matière solidifiée autour de la zone d'impact du faisceau laser. Les spectres EDS (Figure 4, droite) sont caractéristiques d'un acier 316L et l'intensité des pics des éléments identifiés sont très similaires entre la ZAT et le métal de base. Ces observations mettent en évidence une surface propre sans résidus ou éléments exogènes liés au décapage laser, contrairement au cuivre détecté après brossage en laiton (config. F) ou les inclusions de particules abrasives utilisé pour le microbillage (config. H, I). Afin de caractériser la couche de passivation, les éléments principaux comme le chrome, le fer et l'oxygène ont été caractérisés par XPS en surface et en profondeur (via la maîtrise du temps d'érosion).

La Figure 5 montre l'évolution de la quantité en oxygène O1s en fonction du temps d'érosion. Pour les décapages chimiques, la concentration en oxygène de la couche de passivation diminue rapidement entre l'analyse en surface (temps d'érosion = 0s) et les premières analyses en profondeur. Ce comportement est similaire à celui observé pour le métal de base. En revanche, pour les décapages mécaniques et le décapage laser, il a été constaté que la teneur en oxygène entre la surface et le premier point d'analyse en profondeur augmente pour ensuite diminuer progressivement lorsque le temps d'érosion augmente.

Cette différence entre les méthodes de décapage ne suffit cependant pas à établir une relation simple entre la sensibilité à la corrosion et le taux d'oxygène. En revanche une analyse détaillée permettrait de comprendre certains mécanismes comme les concentrations d'oxyde de chrome et de fer ainsi que le ratio Cr oxyde/Cr métal et Fe oxyde/Fe métal.

### 3.1.4. Résistance à la corrosion

Les valeurs de  $E_{corr}$  pour les cordons de soudure de deux nuances décapés par laser sont légèrement inférieures à celle du métal de base et de ceux décapés chimiquement (voir Figure 7 pour l'acier 316L). Ceci pourrait indiquer un caractère moins « noble » de la surface, mais les écarts ne sont pas significatifs.

De plus, une valeur élevée de  $E_{corr}$  n'est pas le seul indicateur d'une bonne résistance à la corrosion, notamment pour les matériaux passifs. Afin d'évaluer les performances des décapages, il est plus pertinent de comparer les valeurs de  $E_{pit}$ , ce qui est un indicateur direct de la résistance à la corrosion par piqûre et donc relié à la rupture de la couche passive de protection pour les aciers inoxydables.

Les résultats de  $E_{pit}$  montrent que le décapage chimique permet de rétablir, voire améliorer la résistance à la corrosion par piqûre des aciers inoxydables austénitiques par rapport au métal de base (Figure 7 pour 316L). Cette tendance est confirmée également pour l'acier 304L, non montré ici.

En revanche, les résultats pour les décapages mécaniques sont moins concluants. Dans le cas de l'acier 304L, le microbillage humide (config. I), le broissage

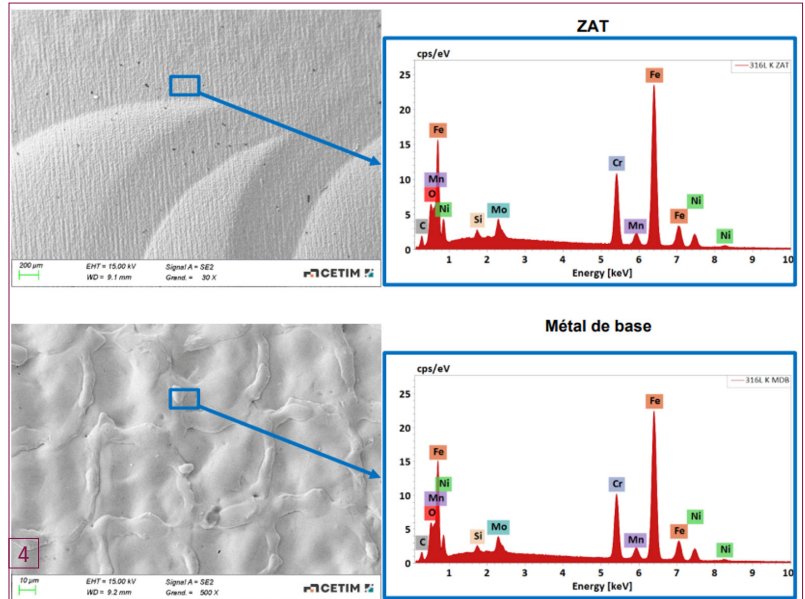


Figure 4. Images MEB et spectres EDS d'une soudure en acier inoxydable 316L au niveau de la ZAT et du métal de base après traitement de décapage par laser (config. K).

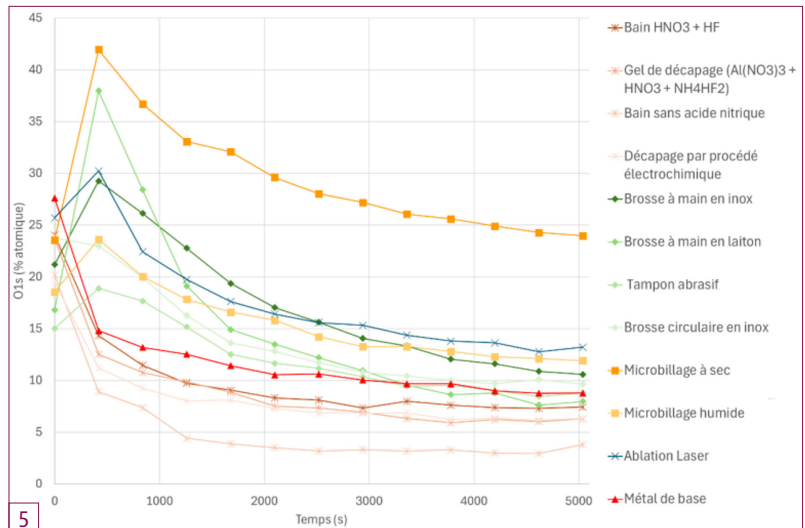


Figure 5. Composition O1s en fonction du temps d'érosion par XPS pour les cordons de soudure en acier inoxydable 316L décapés puis passivés naturellement.

avec fil inoxydable (config. E) et le broissage à ailettes (config. G') ont permis d'atteindre un  $E_{pit}$  comparable au métal de base. Pour l'acier 316L, les décapages suivant les

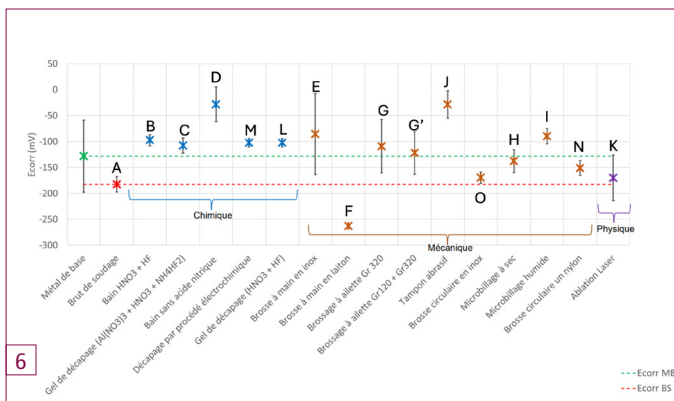


Figure 6. Potentiel de corrosion  $E_{corr}$  pour les zones décapées autour d'un cordon de soudure TIG sur acier 316L.

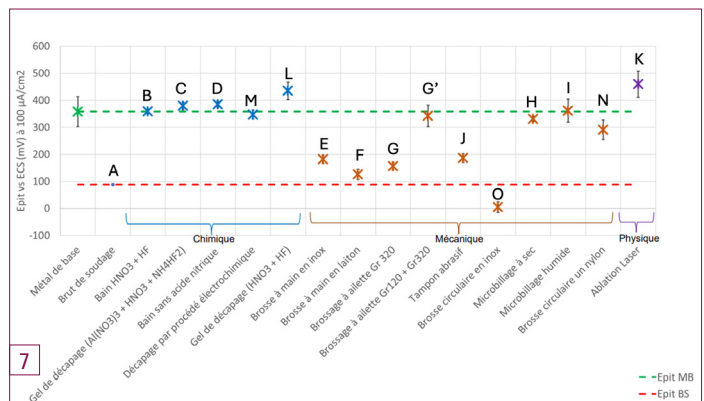
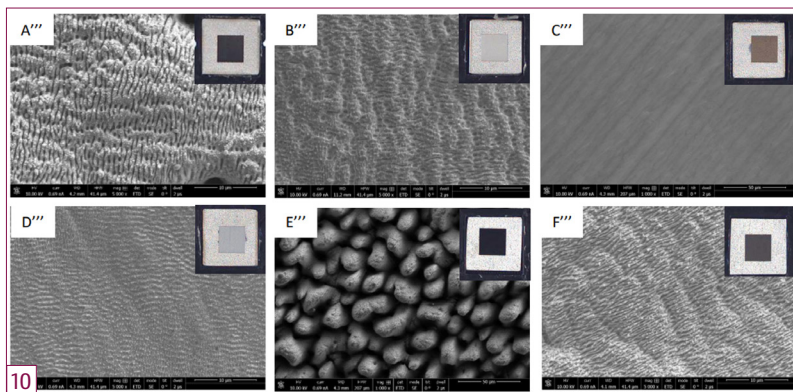
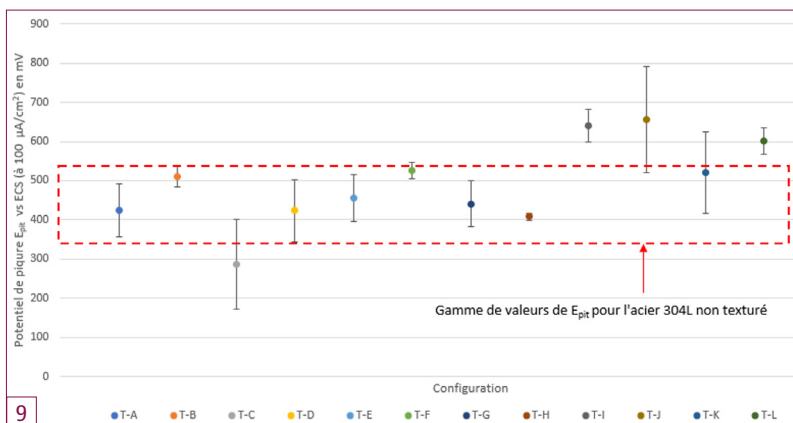
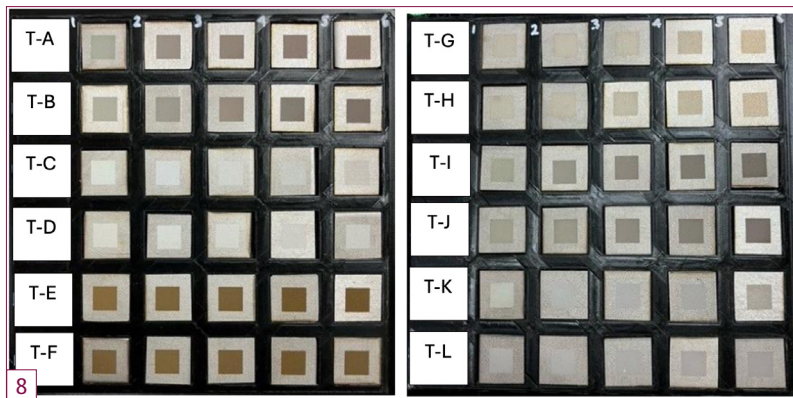


Figure 7. Potentiel de piqûre pour les zones décapées autour d'un cordon de soudure TIG sur acier 316L.



**Figure 8.** Échantillons en acier inoxydable 304L texturés par laser femtoseconde.

**Figure 9 :** Potentiel de piqûre de l'acier 304L texturé puis passivé naturellement en eau de mer synthétique à 25°C

**Figure 10 :** Images MEB des échantillons en acier 304L texturés par laser femtoseconde (avec mode burst suivant les paramètres du Tableau 4)

config. I et G' sont également performants. En revanche, le décapage manuel par fil inoxydable (config. E) n'est pas aussi efficace. Il est alors important que la nuance du fil soit comparable en termes de PREN à l'acier à décapier afin de ne pas diminuer sa résistance à la corrosion. Concernant le décapage laser (config. K), les valeurs de Epit sont supérieures ou équivalentes au métal de base et au décapage chimique standard (config. B) et bien au-dessus de la plupart des méthodes mécaniques. En effet, ce procédé permet (i) l'élimination complète des oxydes ferreux sensibles à la piqûration, (ii) n'apporte pas de pollution externe et (iii) entraîne une rugosité faible (favorable à la passivation naturelle).

### 3.2. Surface texturée

#### 3.2.1. Résultats sur acier 304L

Lorsqu'un laser à durée d'impulsion ultra-courte entre en contact avec la surface, une réorganisation de la matière a lieu. D'un point de vue macroscopique, cela altère la diffraction de la lumière et donc la coloration de la

surface. Ainsi, une surface métallique peut devenir irisée, brune, mat ou même noire selon les paramètres utilisés (voir Tableau 3), comme montré sur la Figure 8.

La texturation laser a également un impact sur la composition chimique de l'extrême surface. Des analyses par XPS ont montré que la concentration en chrome et fer à l'état oxydé et métallique est différente entre les surfaces texturées de l'étude, suggérant des différences de qualité de couche de passivation. De ce fait, la résistance à la corrosion peut également être impactée.

D'après les résultats en Figure 9, la plupart des configurations ont un potentiel de piqûre similaire à l'état brut. Cependant, deux configurations se détachent du reste en raison des valeurs supérieures (~ 640 – 660 mV/ECS). Il s'agit des configurations T-I et T-J.

La seule différence de paramètres laser entre ces deux configurations est le nombre de passes sur l'échantillon. Les analyses XPS ont mis en évidence un ratio Fe/Cr ainsi qu'une épaisseur de couche d'oxydes élevés pour la configuration T-I. Ce constat reste à élucider car la résistance à la corrosion est généralement associée à l'enrichissement en chrome de la couche de passivation et non à l'oxyde de fer.

D'un point de vue microscopique, des structures particulières issues des dommages induits par laser peuvent être observées, il s'agit des LIPSS = Laser-Induced Periodic Surface Structures (voir configurations A''', B''', D''' et F''' de la Figure 10). Les caractéristiques de ces structures périodiques dépendent des paramètres du faisceau laser et des propriétés du matériau.

Un autre type de structures appelé « flower-like » peut aussi être obtenu (voir configuration E''' de la Figure 10), structure qui améliore l'hydrophobie de la surface avec une augmentation de la rugosité de la surface, et qui limite la diffraction de lumière.

Il est à noter que les modifications topographiques liés à la texturation laser en termes de rugosité ne peuvent pas être mesurés par des moyens standards (structuration nanométrique).

Concernant les échantillons texturés et montrés sur la Figure 10, la configuration F''' ayant des structures LIPSS présente la valeur de Epit la plus élevée (~610mV/ECS). La configuration E''' avec une topographie flower-like ne permet pas la formation d'une couche passive efficace (Epit~200mV/ECS), probablement du fait de sa rugosité importante à l'échelle nanométrique. Ce type de texturation est donc à éviter lorsque la surface doit résister à la corrosion.

#### 3.2.2. Résultats sur aciers plus riches en Cr

Afin d'évaluer l'impact de la teneur en chrome dans l'acier inoxydable, la texturation a également été effectuée sur des pièces en acier 316L (%Cr > 16,5%) et 904L (~20%Cr). La Figure 11 montre l'état de surface de ces aciers après texturation. Malgré le fait que les paramètres laser (Tableau 4) ont été identiques à ceux utilisés pour la configuration D''' sur l'acier 304L (%Cr > 17,5% mais sans Mo), il peut être constaté que la topographie est différente à celle observée en Figure 10. Sur certaines zones de la surface, il est tout de même possible

d'observer des LIPSS. Il est possible que le niveau d'énergie nécessaire à texturer ces aciers soit différent, d'où l'aspect hétérogène.

Les analyses semi quantitatives EDX ont mis en évidence un enrichissement en chrome sur les surfaces texturées et une intensité du pic d'oxygène plus importante. Concernant la résistance à la corrosion, les essais électrochimiques révèlent que la texturation effectuée pour la nuance 316L n'apporte pas de réelle amélioration puisque les valeurs  $E_{pit}$  sont similaires avec et sans texturation ( $\Delta E_{pit} < 30mV$ ).

Pour l'acier inoxydable 904L, aucune courbe n'a atteint une densité de courant de  $100\mu A/cm^2$  (pas de piqûre) lors des essais à 25°C. À 40°C, seulement un échantillon représentatif de la surface brute a permis d'obtenir une valeur de  $E_{pit}$  alors que les échantillons texturés n'ont jamais atteint la valeur seuil indiquant une piqûre.

L'essai à 60°C reste le plus probant car la corrosion de la surface brute commençait en moyenne à des valeurs plus faibles de potentiel en comparaison avec les surfaces texturées. À noter également que les valeurs de  $E_{pit}$  pour la surface brute sont plus dispersées que pour les surfaces texturées.

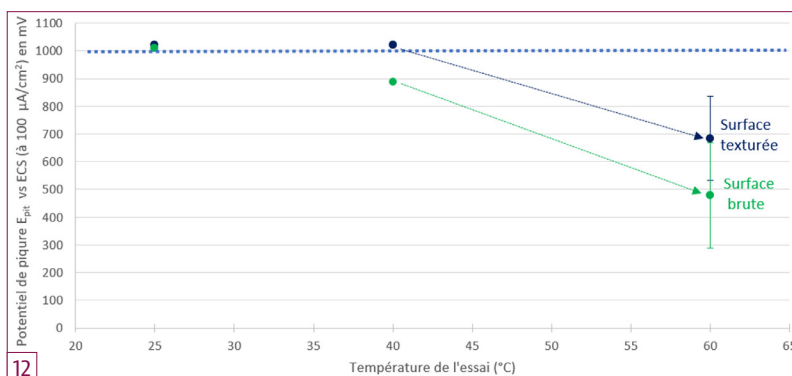
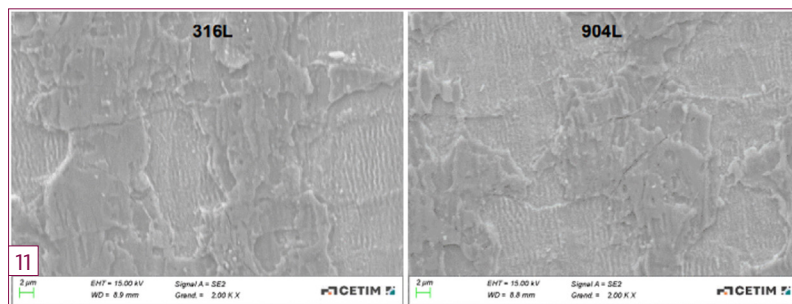
#### 4. CONCLUSIONS

Les travaux menés montrent que la modification laser de la surface des aciers inoxydables, qu'il s'agisse de décapage ou de texturation, constitue une alternative pertinente aux procédés traditionnels, avec des performances variables selon la nuance d'acier inoxydable et les paramètres de laser utilisés.

D'une part, le décapage avec un laser nanoseconde est efficace pour éliminer les oxydes colorés formés lors de la soudure, sans altérer significativement la rugosité de surface ni introduire de contaminants, contrairement à certains traitements mécaniques. Les mesures électrochimiques en eau de mer indiquent que le potentiel de piqûre  $E_{pit}$  obtenu est équivalent ou supérieur à celui du métal de base et comparable aux décapages chimiques, confirmant une formation d'une couche passive stable.

D'autre part, la texturation avec un laser femtoseconde engendre des modifications topographiques et chimiques significatives, notamment la formation de structures LIPSS ou « flower-like ». Ces modifications peuvent impacter la résistance à la corrosion. Sur l'acier 304L, certaines configurations comme T-I et T-J montrent une augmentation du potentiel de piqûre, tandis que d'autres (notamment celles engendrant des structure flower like) diminuent les performances. Pour les nuances plus riches en chrome (316L, 904L), les texturations testées n'apportent pas d'amélioration systématique, bien que des valeurs de  $E_{pit}$  supérieures soit observée à 60°C pour le 904L.

Globalement, ces résultats démontrent que les procédés laser sont capables d'améliorer ou d'ajuster sélectivement les propriétés des aciers inoxydables comme la résistance à la corrosion, mais que les performances finales nécessitent une optimisation fine des paramètres en fonction de la nuance et de l'application visée. ■



**Figure 11.** Images MEB montrant l'hétérogénéité des échantillons en 316L et 904L texturés avec le mode burst.

**Figure 12.** Potentiel de piqûre en fonction de la température dans l'eau de mer synthétique pour l'acier 904L texturé et à l'état brut. À noter que les points au-dessus de 1000 mV/ECS sont uniquement à titre indicatif, aucune piqûre n'a eu lieu lors de ces mesures.

#### 5. BIBLIOGRAPHIE

1. Ruge, J. et Radebold, L. Einfluss von durch Schweißen erzeugten Oxidfilmen auf die Lochfrassbeständigkeit nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stähle in annähernd neutralen Chloridlösungen. Frankfurt: s.n., 1990.
2. Femtosecond Laser Precision Engineering: From Micron, Submicron, to Nanoscale. Lin, Z. et al. Ultrafast Science, 2021. DOI: 10.34133/2021/9783514
3. The ferritic stainless family: The appropriate answer to nickel volatility? Review of Metallurgy, 2009. 106(3):124-139 DOI:10.1051/metal/2009024)

#### 6. REMERCIEMENTS

Les présents travaux ont été réalisés dans le cadre de deux Projets Stratégiques Sectoriels (PSS Traitement des Effluents et Substitutions et PSS Soudabilité) et dans les projets de recherche sur la texturation laser. Ces activités sont financées par la taxe reçue par le CETIM de la part des industriels de la mécanique.