

# Etude de la sensibilité à la corrosion sous contrainte de joints soudés en aciers inoxydables



**Laura DE LIMA E SILVA<sup>a</sup>**

*Nadège DUCOMMUN<sup>b</sup>, Laurent JUBIN<sup>c</sup>, Eric ANDRIEU<sup>d</sup>, Christine BLANC<sup>d</sup>*

*<sup>a</sup>Doctorante, laboratoire CIRIMAT, INP Toulouse ENSIACET, Toulouse*

*<sup>b</sup>Responsable technique, pôle MMS, CETIM, Nantes*

*<sup>c</sup>Responsable technique, pôle IDA, CETIM, Nantes*

*<sup>d</sup>Directeurs de thèse, laboratoire CIRIMAT, INP Toulouse ENSIACET, Toulouse*

Contexte  
Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

2<sup>eme</sup> étape

Conclusion

CSC concerne des secteurs industriels et des équipements très divers :

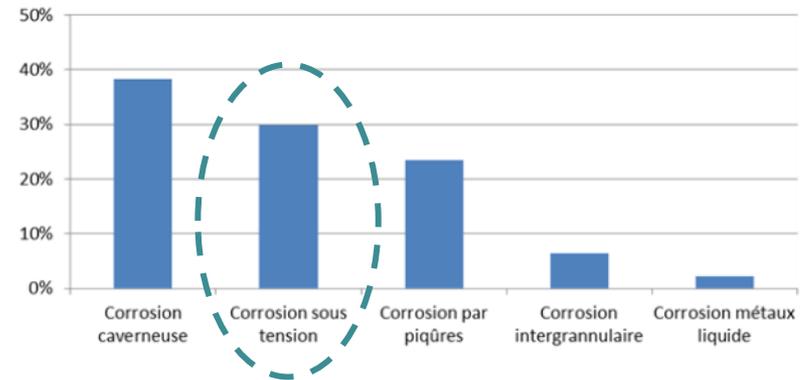
- Echangeurs
- Ballons d'eau chaude
- Équipements pour l'agro-alimentaire

Assemblage à l'arc des aciers inoxydables austénitiques :

- X2CrNi18-9 ou 304L (~50% cas)
- X2CrNiMo17-12-2 ou 316L (~30% cas)

Criticité de cette problématique: il est difficile de prédire et prévenir la CSC qui dépend de variables multiples

Corrosion sur les aciers inoxydables



Contexte Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

2<sup>eme</sup> étape

Conclusion

Variables :

- Environnement (mécanique, physico-chimique)
- Matériau
  - X2CrNi18-9 (304L) et X2CrNiMo17-12-2 (316L)
  - X2CrNiMoN22-5-3 (2205)
- Procédé de soudage (TIG)

Mécanique : nature de la contrainte

- Résiduelle
- Service

Paramètres physico-chimiques

- T°C
  - [Cl<sup>-</sup>]
  - pH
- } avec gradients



Composition Chimique

- Cr
- Mo
- N

Microstructure

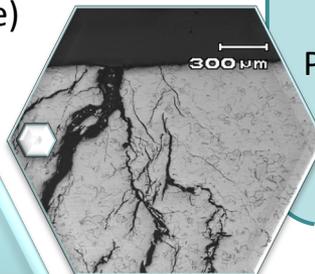
- Austénitique
- Duplex austeno-ferritique
- Phases secondaires
  - $\sigma$
  - $\chi$
  - $M_{23}C_6$

Propriétés mécaniques

avec gradients

Environnement

Aciers Inoxydables



TIG



Gradients métallurgiques

- Précipitation
- Taille de grains
- Ferrite- $\delta$

Oxydation de surface

- Décapage
- Polissage
- Brut de soudage

Gradients mécaniques

- Défauts
- Contraintes résiduelles

Contexte  
Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

2<sup>eme</sup> étape

Conclusion

- Etude de la sensibilité à la CSC des joints soudés en aciers inoxydables dans des milieux contenant des ions chlorures
  - Matériaux : X2CrNi18-9 (304L), X2CrNiMo17-12-2 (316L) et X2CrNiMoN22-5-3 (2205)
  - Paramètres physico-chimiques caractéristiques de l'environnement : température, teneur en ions chlorures, pH
  - Gradients de propriétés : microstructure, défauts et contraintes résiduelles
  - États d'oxydation : protection gazeuse
  - États de surface : surfaces polies, brutes de soudage ou décapées
- Proposer un test discriminant pour classer les joints soudés en fonction de leur sensibilité à la CSC

Contexte Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

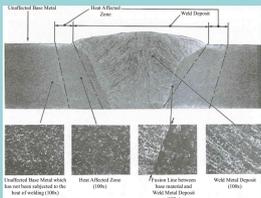
2<sup>ème</sup> étape

Conclusion

## 1<sup>ère</sup> étape

Caractérisation de la microstructure et des propriétés mécaniques

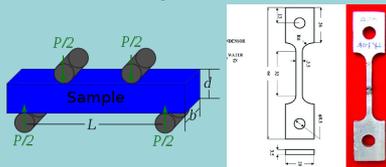
Microscope optique, MEB, EDS, EBSD, MET, XRD, microscope confocal et XPS  
Essais de traction, dureté  
Comportement en corrosion



## 2<sup>ème</sup> étape

Sensibilité à la CSC à l'échelle macroscopique

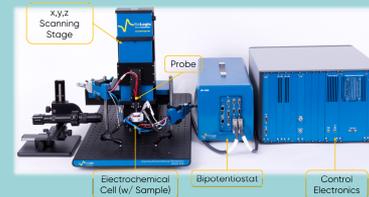
Essais mécaniques  
**Déplacement ou chargement imposé**  
(Environnement : T°C, [Cl<sup>-</sup>], pH) (Procédé : énergie et pollution)  
**Charge imposée**  
(soudure complète et chaque zone)



## 3<sup>ème</sup> étape

Sensibilité à la CSC à l'échelle microscopique

Essais in situ  
Microscopie électrochimique à balayage  
(surfaces polies, brutes de soudage ou décapées)



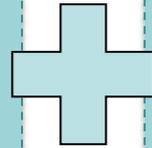
## 4<sup>ème</sup> étape

Proposition d'un test permettant de classer les joints soudés en acier inoxydable en fonction de leur résistance à la CSC



## Métal de base

- Microstructure
- Propriétés mécaniques



## Soudures

- Microstructure
  - Propriétés mécaniques
- Energie : Haute et basse  
[O<sub>2</sub>] : 100 et 10000 ppm  
protection inverse



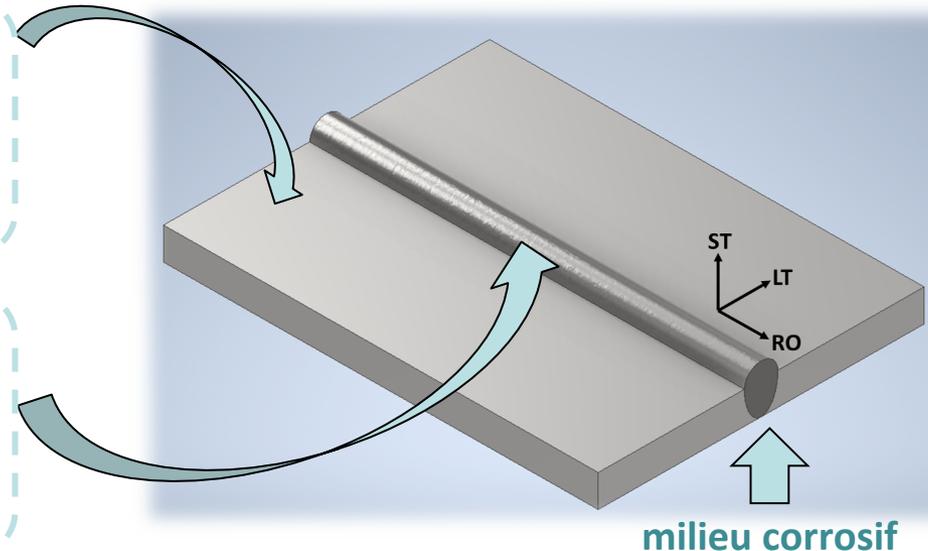
**Paramétrage des essais de CSC**  
(2<sup>eme</sup> étape)

Métal de base → Tôles de 3mm d'épaisseur

- 304L
- 316L
- 2205

TIG avec métal d'apport → 0.8mm Ø

- 304 L → 308L
- 316L → 316L
- 2205 → 2209



**milieu corrosif**

Contexte  
Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

2<sup>eme</sup> étape

Conclusion

**Métal de base**

Microstructure

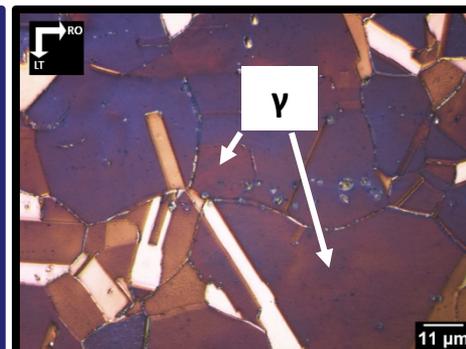
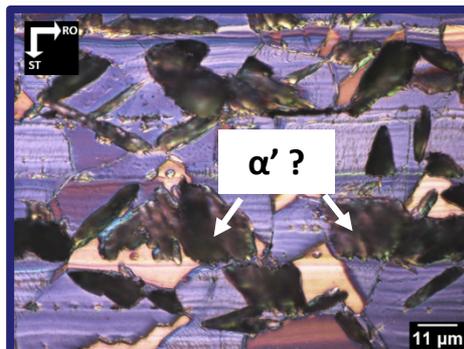
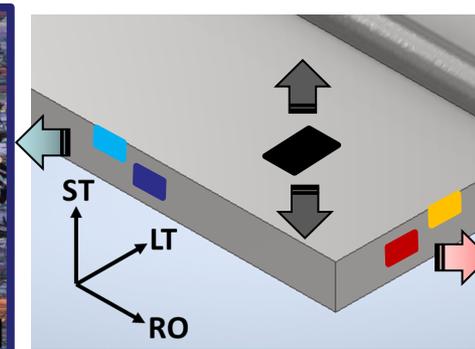
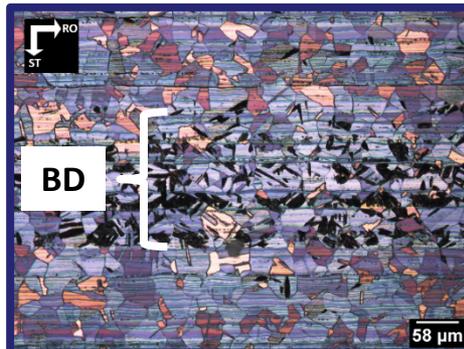
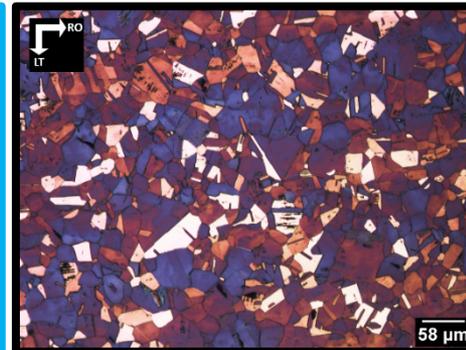
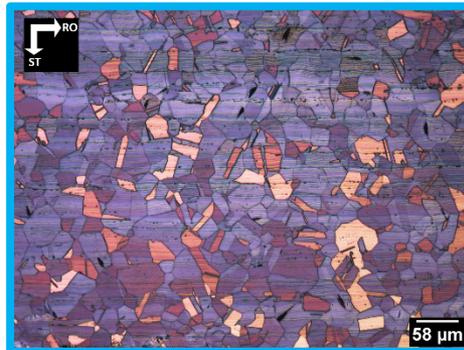
**304L**

Grains :

- Taille moyenne 30µm
- Équiaxes

Bande de contraste différent :

Épaisseur : 130µm



**Forts gradients  
microstructuraux**

Contexte Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

2<sup>eme</sup> étape

Conclusion

**Métal de base**

Microstructure

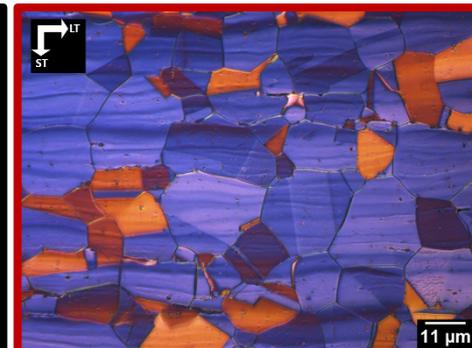
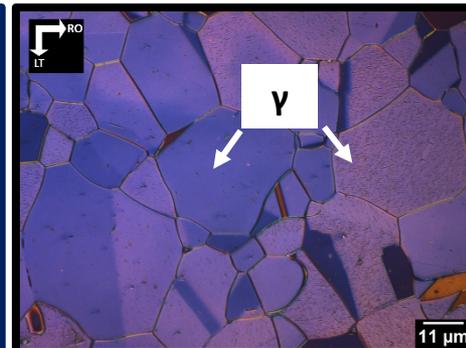
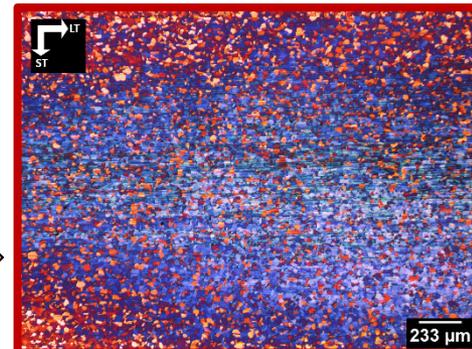
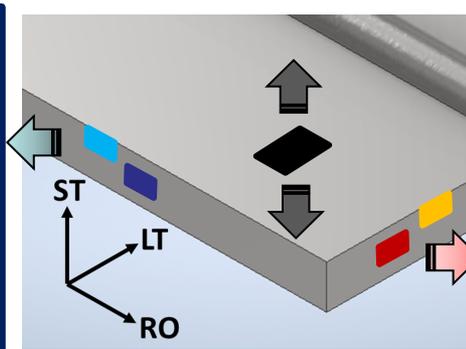
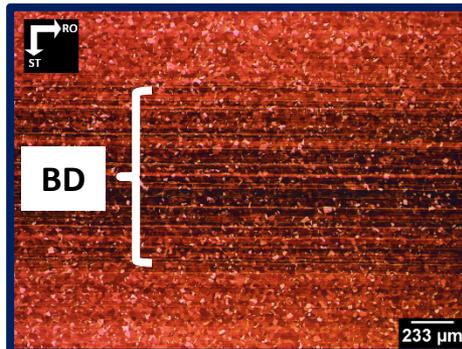
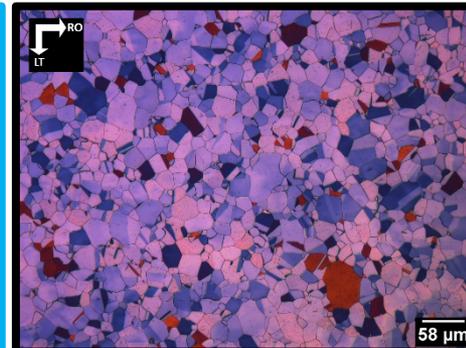
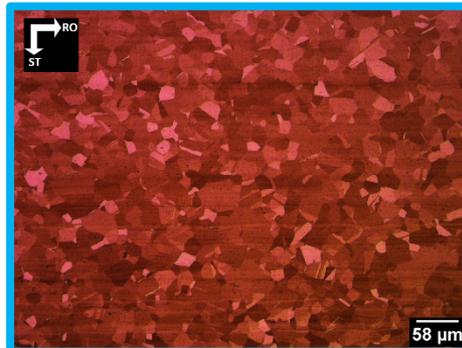
**316L**

Grains :

- Taille moyenne 15 $\mu$ m
- Équiaxes

Bande de contraste différent :

Épaisseur : 1200 $\mu$ m



**Forts gradients microstructuraux**

Contexte Industriel

Objectif

Planning

1<sup>er</sup> étape

2<sup>eme</sup> étape

Conclusion

Métal de base

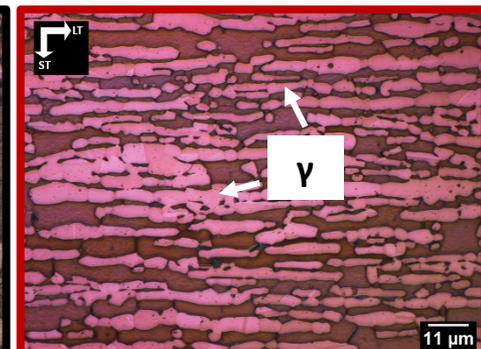
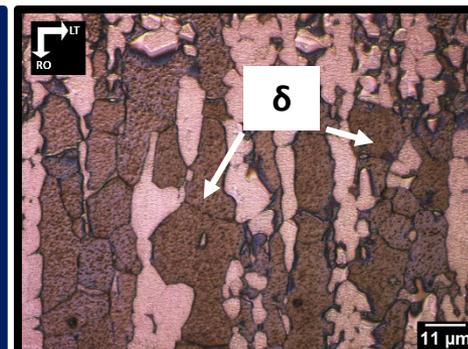
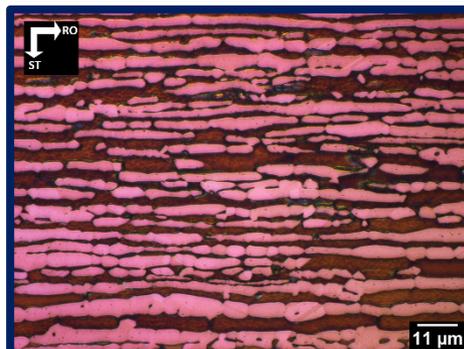
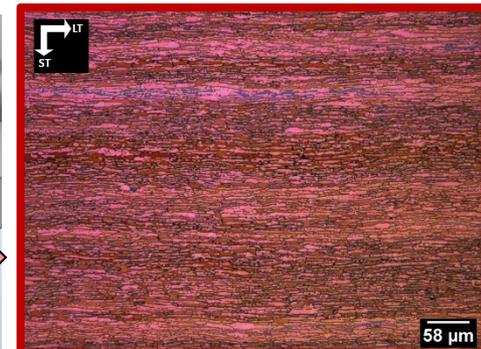
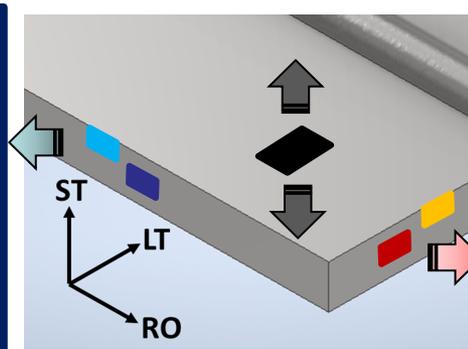
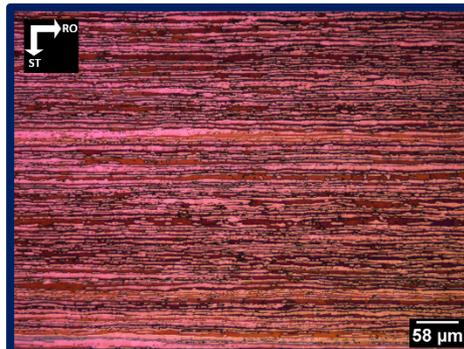
Microstructure

2205

Grains allongés dans la direction de laminage

Pourcentage de ferrite :  
~50%

Microstructure homogène, biphasée et laminée





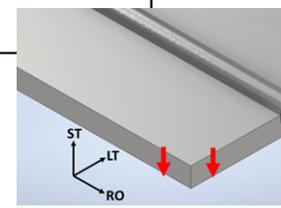
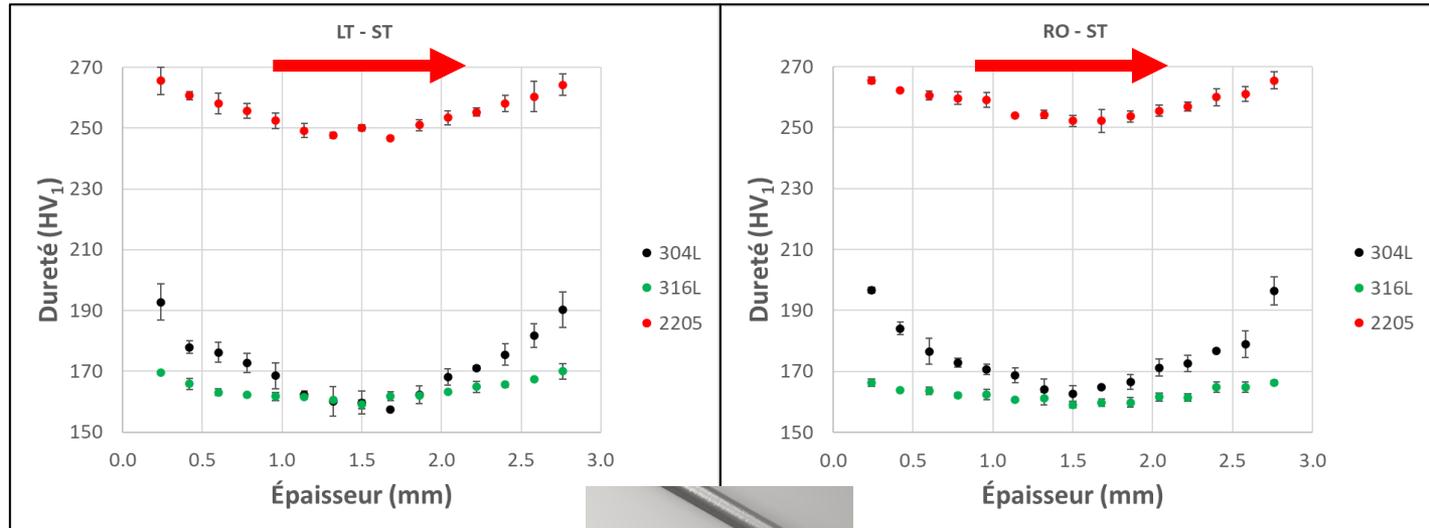
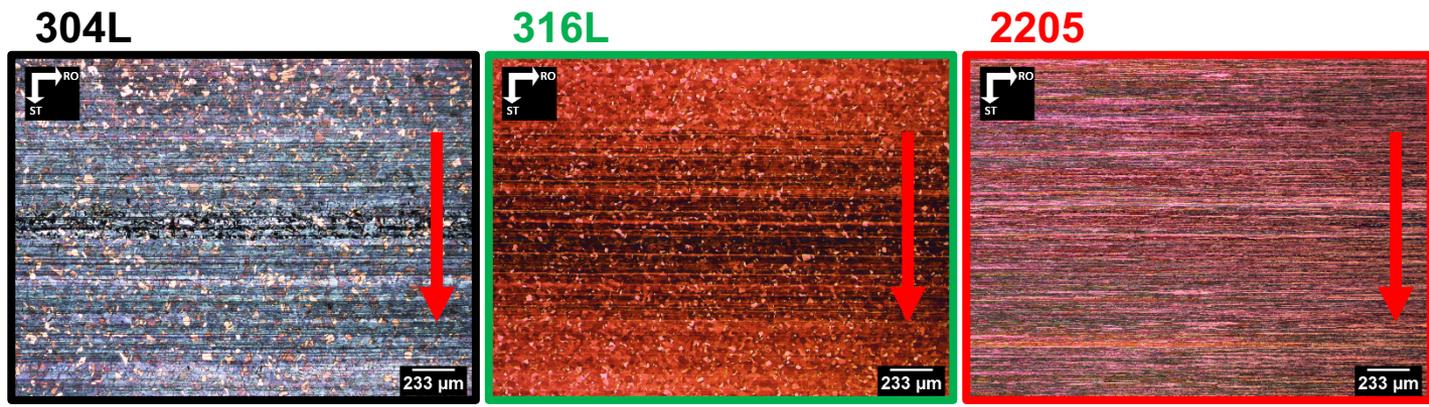
**Métal de base**

Propriétés mécaniques

Essais de dureté

Charge d'essai :  
1 kg  
Taille de la diagonale :  
100 μm

**304L et 2205 propriétés anisotropes dans l'épaisseur**





## Métal de base

### Propriétés mécaniques

Essais de traction

Eprouvettes plates

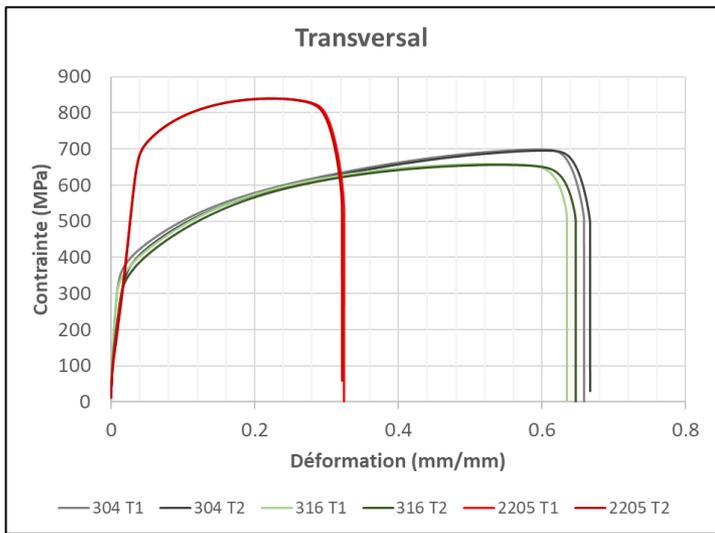
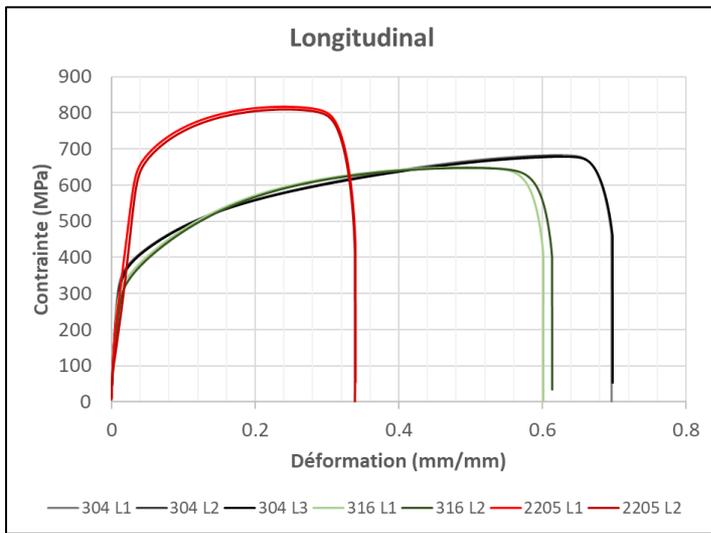
Vitesse de déformation :

$$10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

**Dans le plan de la tôle :**

**304L et 316L anisotropes élastiquement**

**2205 anisotrope plastiquement**



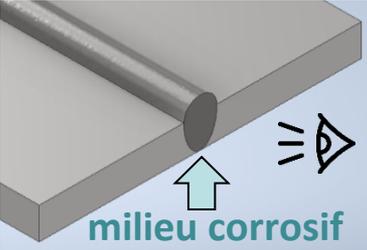
Echantillon		E (GPa)	YS <sub>0.2</sub> (MPa)	UTS (MPa)	Def_Rup (mm/mm)
304	L	160	325	680	0,70
304	T	200	330	700	0,65
316	L	160	300	650	0,61
316	T	200	315	660	0,64
2205	L	200	600	810	0,34
2205	T	210	650	840	0,32



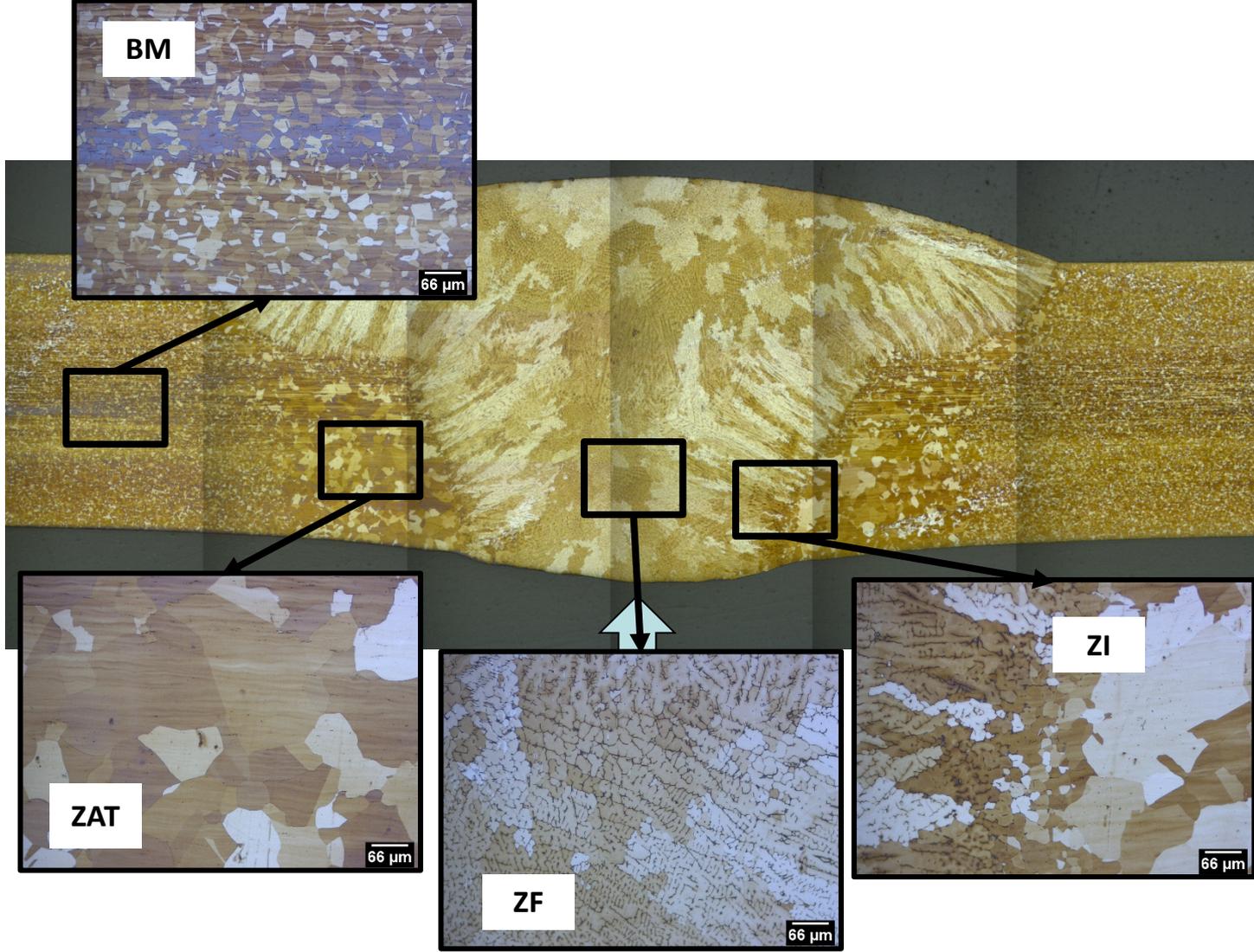
**Soudure**

Microstructure

**316L-HHI-LO**



Zone fondue (ZF) :  
dendrites d'austénite  
Zone interfaciale (ZI) :  
structure cellulaire  
Zone affecté  
thermiquement (ZAT) :  
croissance des grains





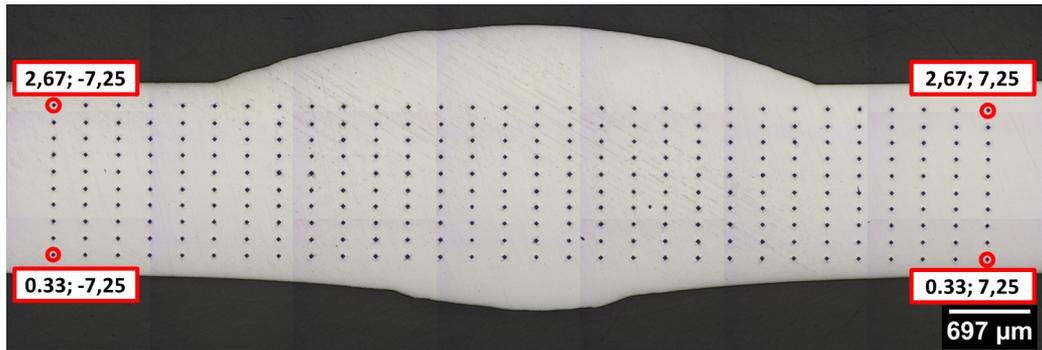
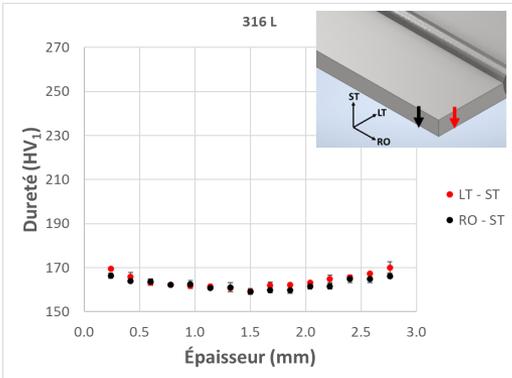
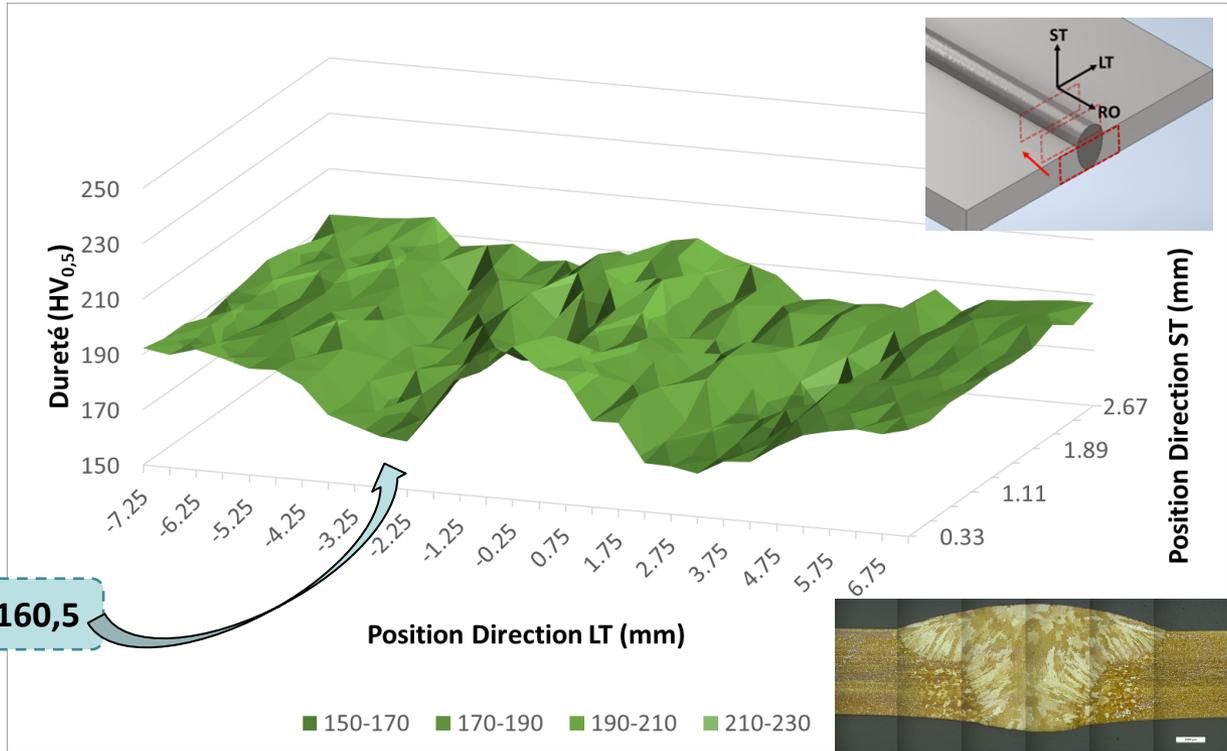
## Soudure

Propriétés  
mécaniques

## 316L-HHI-LO

Essai de dureté (10 mesures)  
300 indents  
Charge d'essai :  
0.5kg

**HV<sub>0.5min</sub> = 160,5**





**Paramétrage essais CSC**

**Milieu corrosif**

- Température
  - 25, 50 et 80°C
- [Cl<sup>-</sup>]
  - 1M et 0.5 M
- pH
  - 4, 6 et 8

**Contrainte**

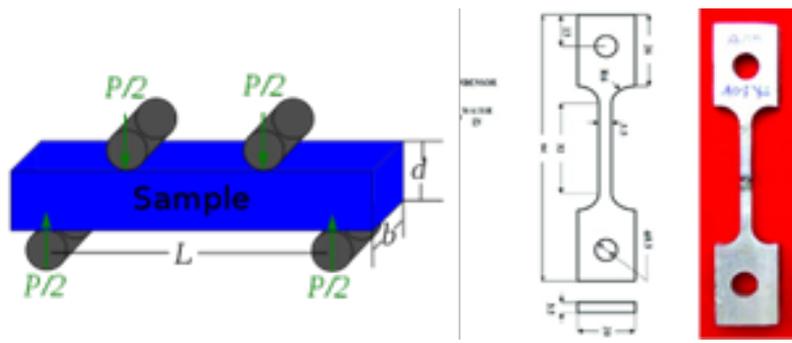
- Déterminer la limite d'élasticité la plus basse de la soudure
- 85, 95 et 110% YS<sub>0.2</sub>

**Problématique :**

- La soudure n'a pas une épaisseur constante
- Vérifier s'il est possible de mettre en relation la dureté et la limite d'élasticité

**Essais paramétriques → deux étapes**

- Flexion quatre points (étude du milieu)
- Essais à contrainte imposée (étude du comportement du matériau)





## Corrélation entre HV et $YS/R_m$ ?

Essais de traction interrompus combinés avec des mesures de dureté (10 kg)  
Éprouvettes plates

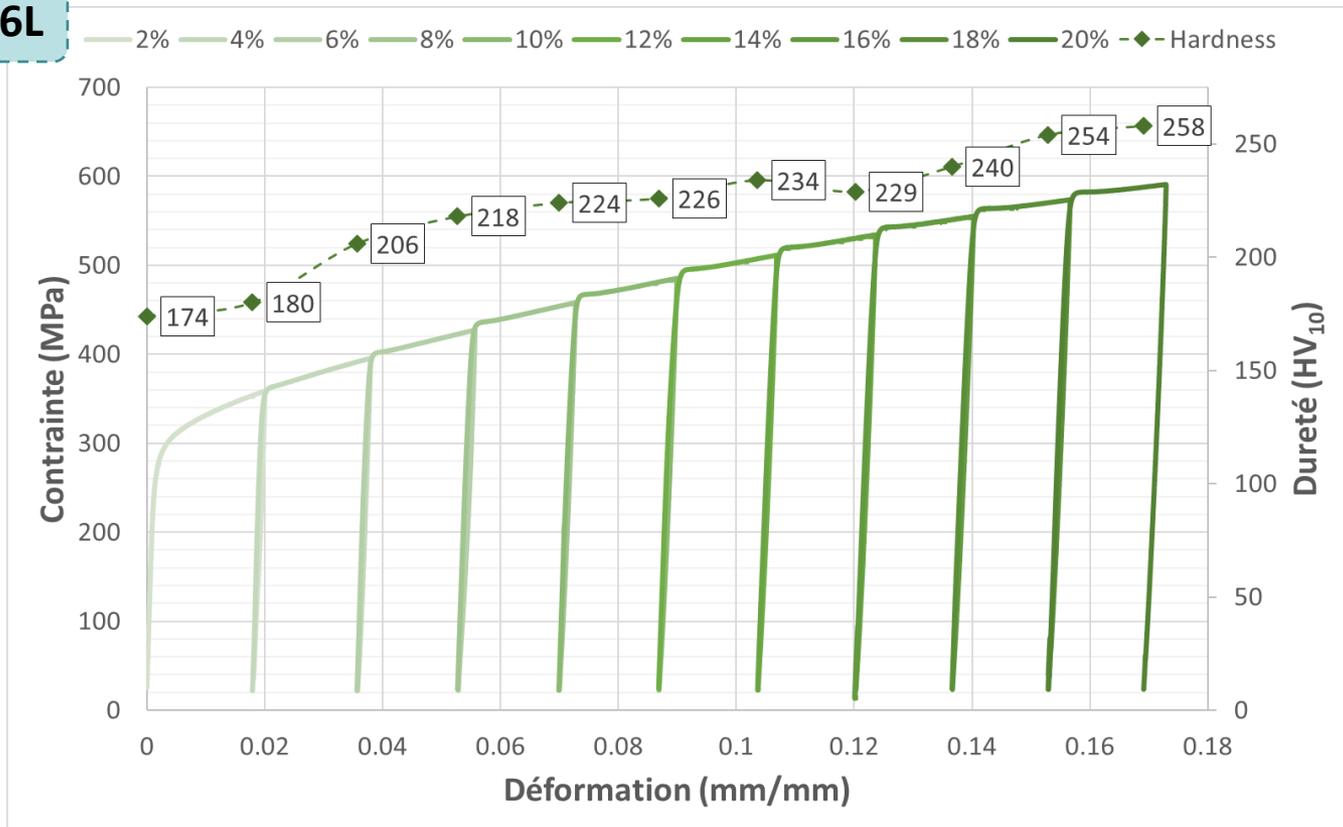
Vitesse de déformation :

$$10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Incréments de déformation :

2%

**316L**



**La dureté augmente avec la déformation → La limite d'élasticité peut être calculée via la dureté**

$$YS = \frac{HV}{3} (0.1)^n$$

n = coefficient d'écrouissage

Nobre, J. P., Dias, A. M., & Kornmeier, M. (2004). *Experimental Mechanics*, 44(1), 76–84.  
Cahoon, J. R., Broughton, W. H., & Kutzak, A. R. (1971). *Metallurgical Transactions*, 2(7), 1979–1983.



Corrélation entre HV et  $YS/R_m$  ?

$$\sigma = \sigma_0 + K_1 \epsilon_p^n$$

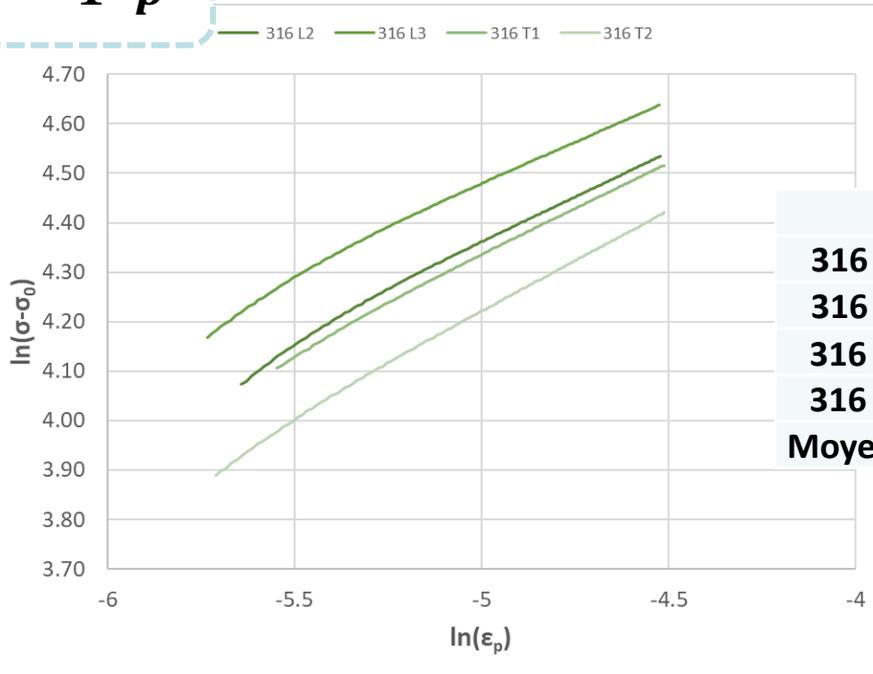
**316L**

Calcul de « n »

Données de traction 316L

Éprouvettes plates

Vitesse de déformation :  
 $10^{-3} \text{ s}^{-1}$



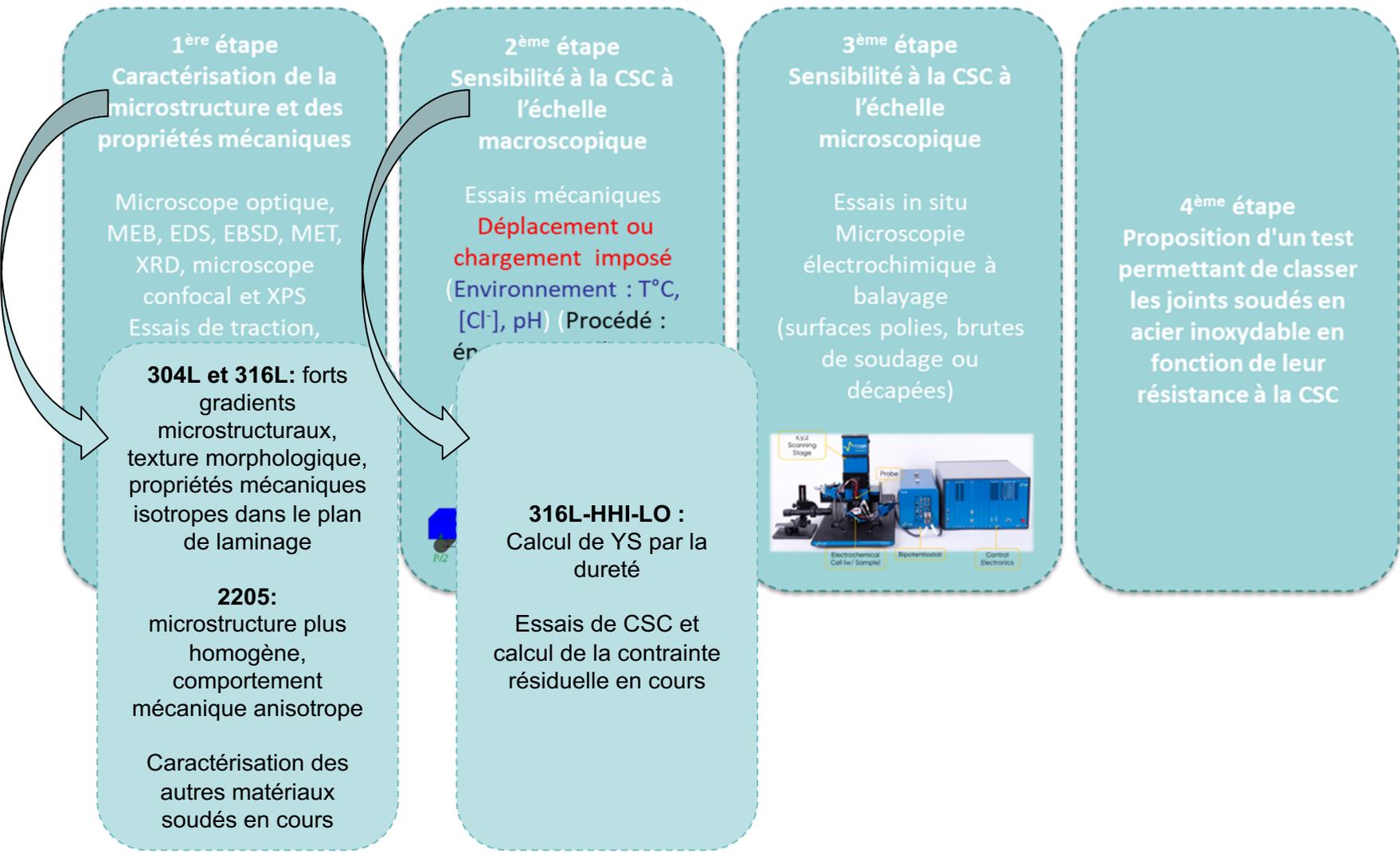
Valeur plus faible de la soudure  
**316-HHI-LO**

$$YS = \frac{HV}{3} (0.1)^n$$

$$160.5 \text{ HV} \left( \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \right) = 1574 \text{ MPa}$$

$$YS = \frac{1574}{3} (0.1)^{0.394}$$

$$YS = 212 \text{ MPa}$$



**Merci pour votre attention !**

[laura.delimaesilva@toulouse-inp.fr](mailto:laura.delimaesilva@toulouse-inp.fr)

[Laura.DeLimaESilva@cetim.fr](mailto:Laura.DeLimaESilva@cetim.fr)