

CLUB CAST3M, NOVEMBRE 2025

TUYAUTERIES SOUMISES À LA STRATIFICATION THERMIQUE

ESTIMATION DES CONTRAINTES ET DÉFORMATIONS

MINH BAO LE ET AL.

INGÉNIEUR D'ÉTUDE ET DE RECHERCHE

LABORATOIRE DE MODÉLISATION ET D'ANALYSE DE LA PERFORMANCE DES STRUCTURES, ASNR/DES/SES/LMAPS

SOMMAIRE

01

INTRODUCTION

02

MODÈLES AUX ÉLÉMENTS FINIS

03

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

04

CRITÈRES DE FATIGUE
OLIGOCYCLIQUE

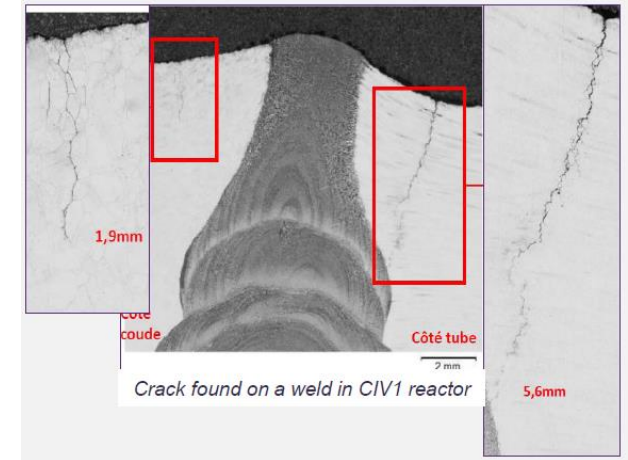
INTRODUCTION

Plusieurs fissures de corrosion sous contraintes (CSC) et de fatigue ont été détectées sur les lignes auxiliaires du circuit primaire principal (CPP) des réacteurs en exploitation en France

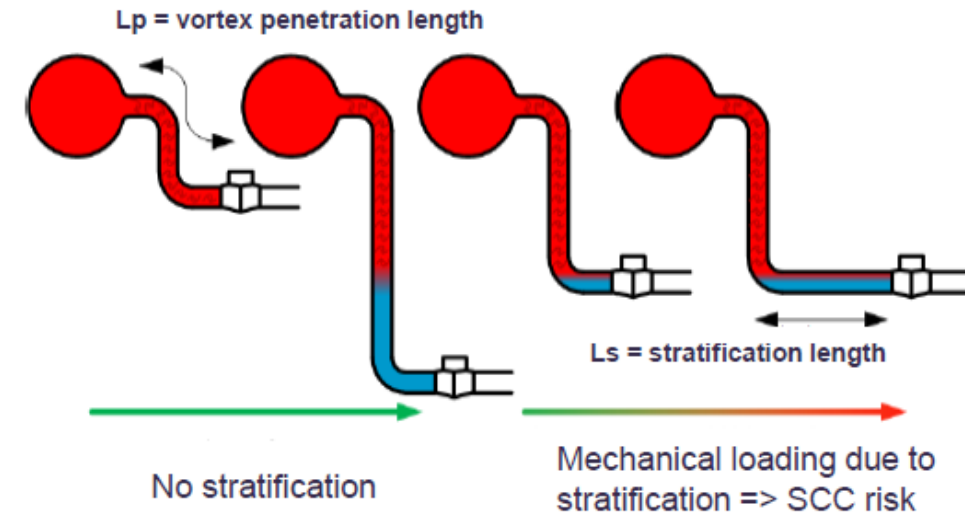
Les investigations à ce jour conduisent à attribuer l'amorçage de ces fissures aux chargements thermiques dans ces lignes, notamment liés au vortex et à la stratification thermique

(<https://reglementation-controle.asnr.fr/controle/corrosion-sous-contrainte>)

Le présent travail de l'ASNR vise à étudier les contraintes et déformations générées dans les lignes stratifiées pour apporter des éléments de compréhension sur le sujet



Vortex and stratification



SOMMAIRE

01

INTRODUCTION

02

MODÈLES AUX ÉLÉMENTS FINIS

03

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

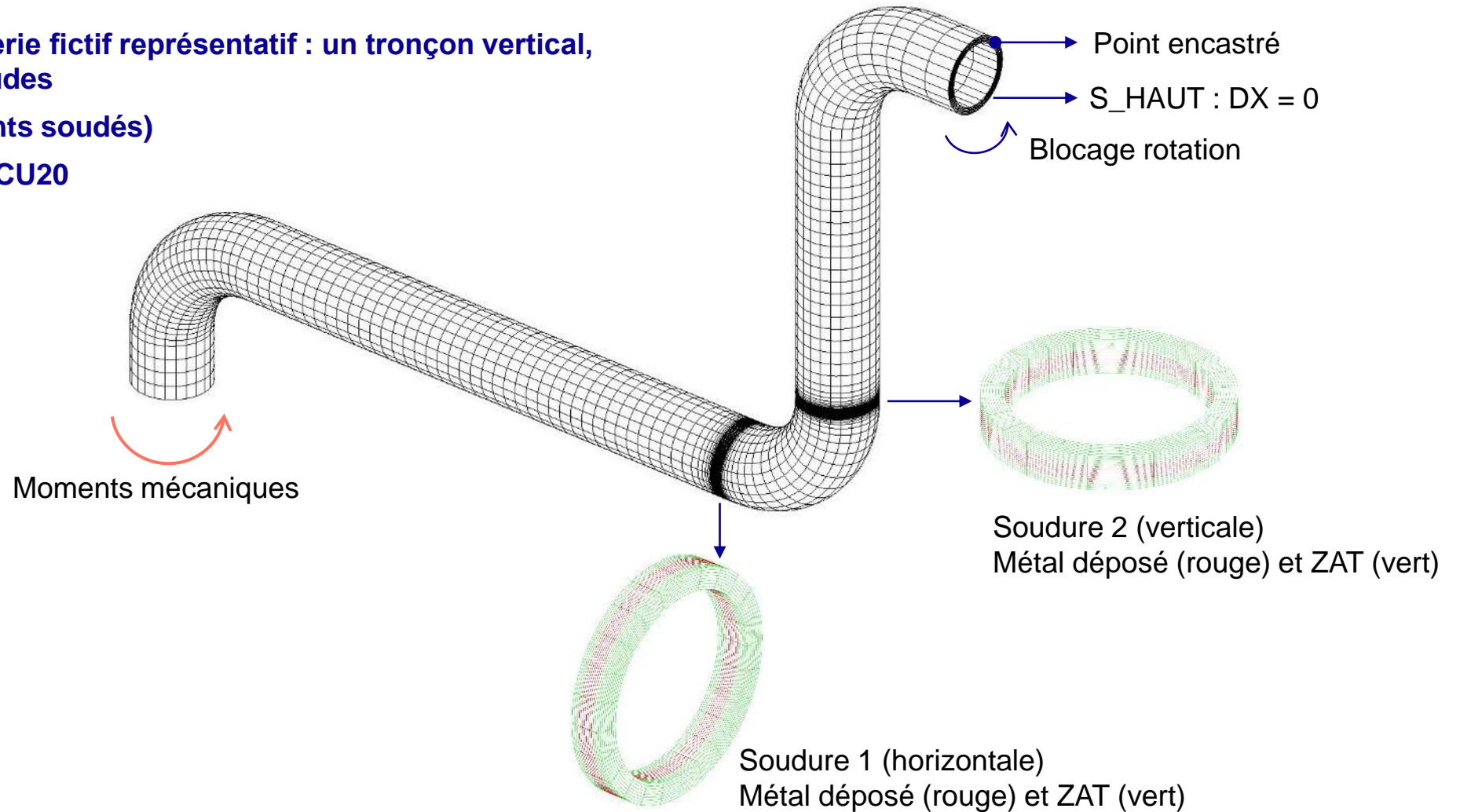
04

CRITÈRES DE FATIGUE
OLIGOCYCLIQUE

MODÈLE CAST3M

Maillage d'un tronçon de tuyauterie fictif représentatif : un tronçon vertical, un tronçon horizontal et des coudes

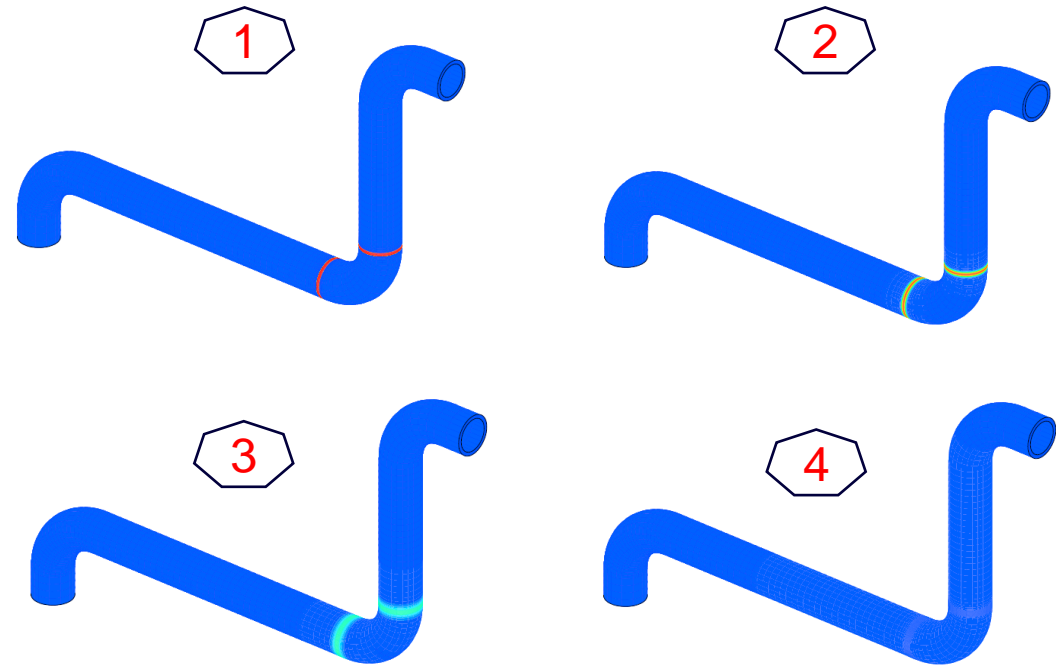
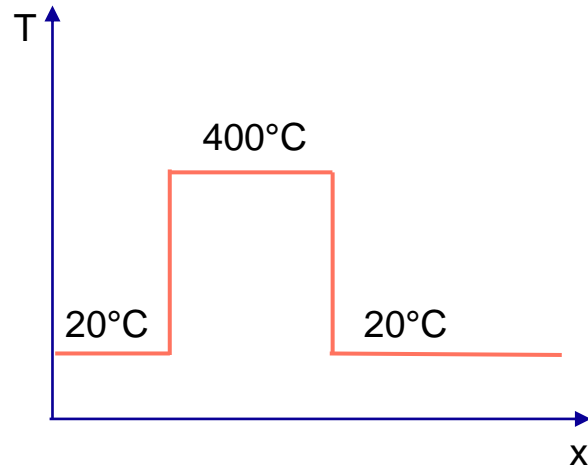
- Taille minimale de 5 mm (2 joints soudés)
- 32000 éléments quadratiques CU20



SOLlicitATIONS THERMIQUES

SIMULATION SIMPLIFIÉE DU « SOUDAGE »

- L'objectif est de simuler les déformations initiales et un état de contraintes résiduelles de traction dans la ZAT représentatif d'un état résiduel post-soudage
- Pas de simulation numérique du soudage (SNS) mais uniquement une montée en température du métal déposé pour générer les contraintes et les déformations thermiques dans le joint soudé
- Calcul thermique de l'état initial :
 - ✓ 400°C dans le métal déposé
 - ✓ 20°C dans les ZAT et métal de base

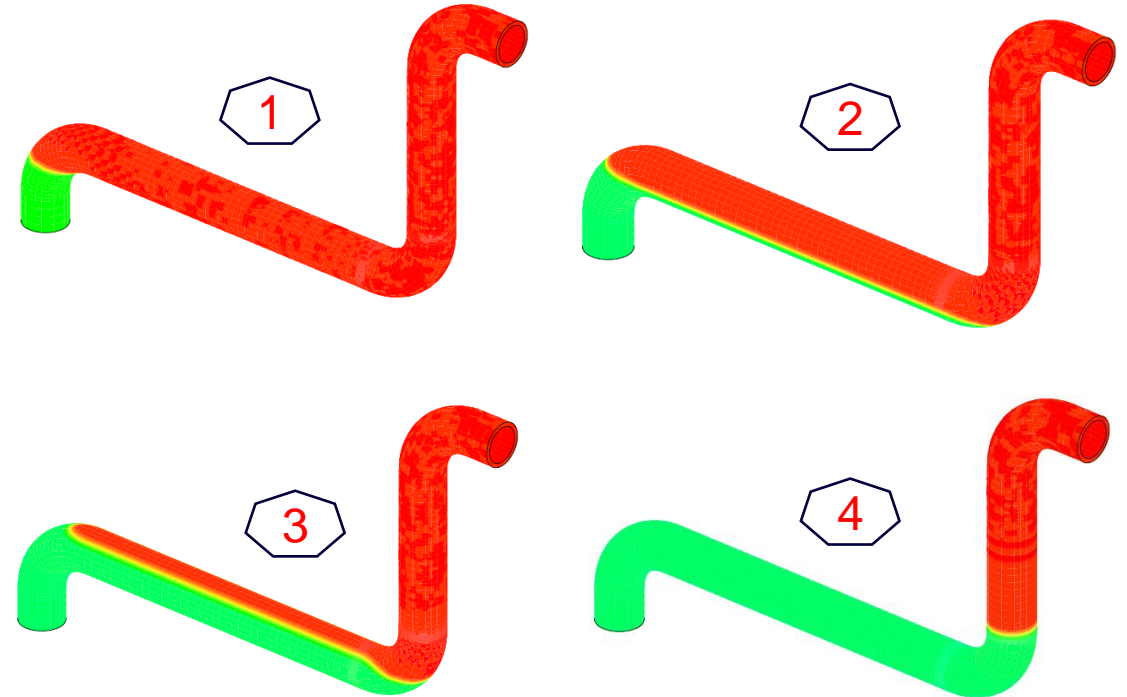


SOLlicitations THERMIQUES

SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DU VORTEX - STRATIFICATION

■ Hypothèses retenues pour les calculs thermomécaniques

- ✓ $T_{max} = 300^{\circ}\text{C}$, $T_{min} = 120^{\circ}\text{C}$ (variation linéaire dans une zone de 20 mm)
- ✓ 1 cycle thermique = vortex se déplaçant du tronçon bas (état 1) vers le tronçon vertical haut (état 4) et retour vers le tronçon bas (état 1)
- ✓ Le déplacement du vortex est supposé suffisamment lent : la température atteint son état stationnaire pour chaque position du vortex



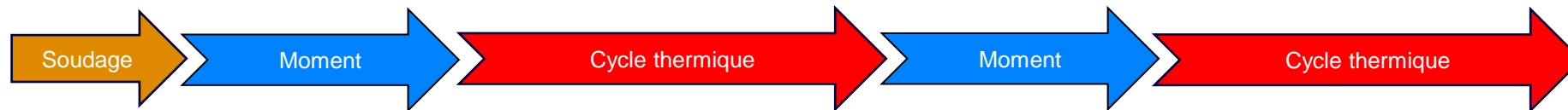
SOLlicitATIONS THERMOMÉCANIQUES

Simulations découplées entre les moments mécaniques et les sollicitations thermiques

SIMULATION DES CYCLES THERMOMÉCANIQUES

- 1) « Soudage »
- 2) Moment mécanique (M_{min})
- 3) Cycle thermique (aller – retour)
- 4) Variation du moment (M_{min} à M_{max})
- 5) Cycle thermique (aller – retour)

Les cycles thermomécaniques sont répétés plusieurs fois



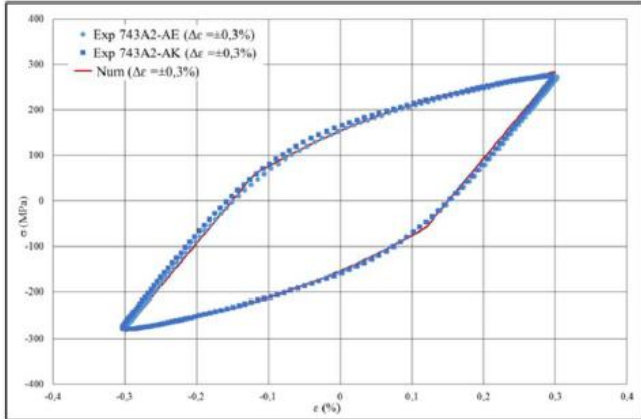
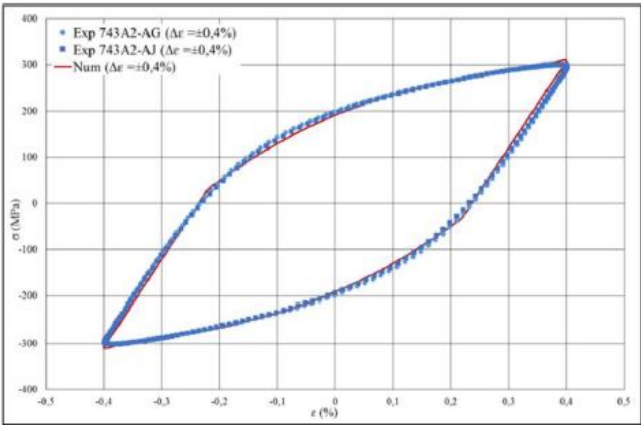
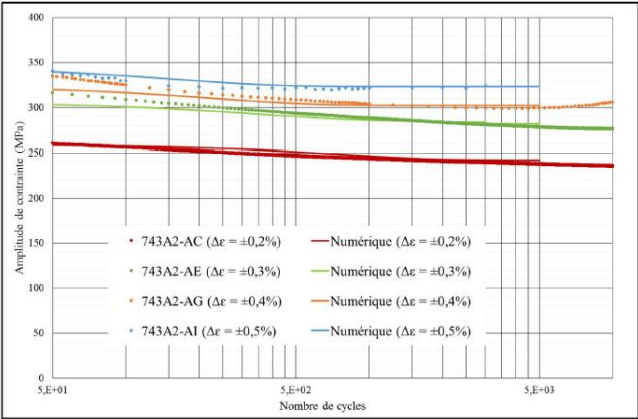
LOI DE COMPORTEMENT CYCLIQUE

MODÈLE DE CHABOCHE A DEUX CENTRES CINÉMATIQUES

Modèle d'écrouissage mixte (isotrope et cinématique) adapté pour simuler le comportement cyclique des aciers inoxydables de type 316L

Les paramètres, issus des travaux de thèse Dhahri (CEA, 2019), identifiés pour l'acier 316L à 300°C

Paramètres	A1 (MPa)	C1	A2 (MPa)	C2	Ψ	Ω	R0 (MPa)
Valeurs initiales	$43,2 \cdot 10^6$	1800	$340 \cdot 10^6$	110	1	0	$120 \cdot 10^6$



Validation expérimentale de loi de Chaboche 2 pour les essais cycliques à 300°C : évolution de l'amplitude de contrainte avec le nombre de cycle, le cycle stabilisé pour $\Delta\epsilon=0,4\%$, le cycle stabilisé pour $\Delta\epsilon=0,3\%$.

SOMMAIRE

01

INTRODUCTION

02

MODÈLES AUX ÉLÉMENTS FINIS

03

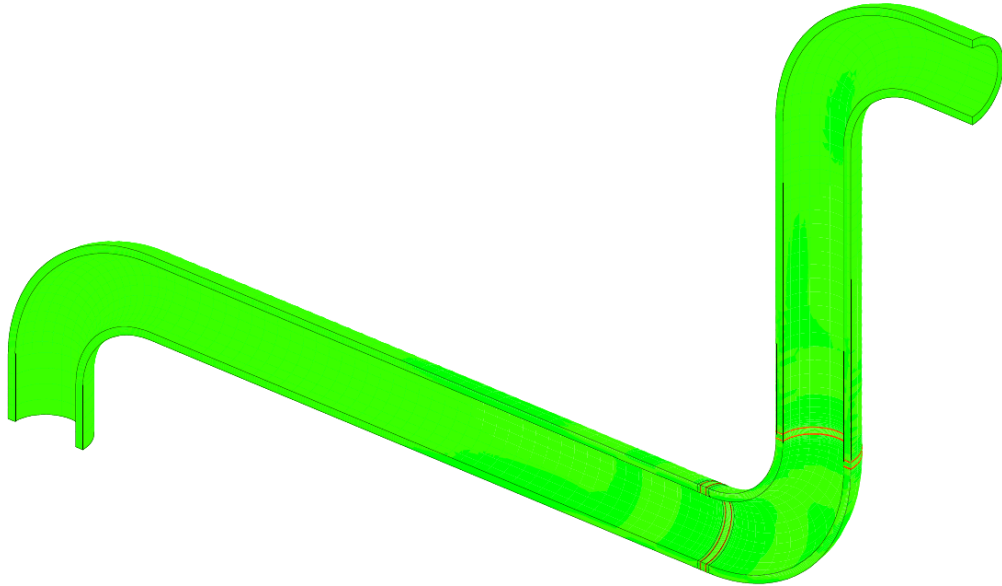
RÉSULTATS NUMÉRIQUES

04

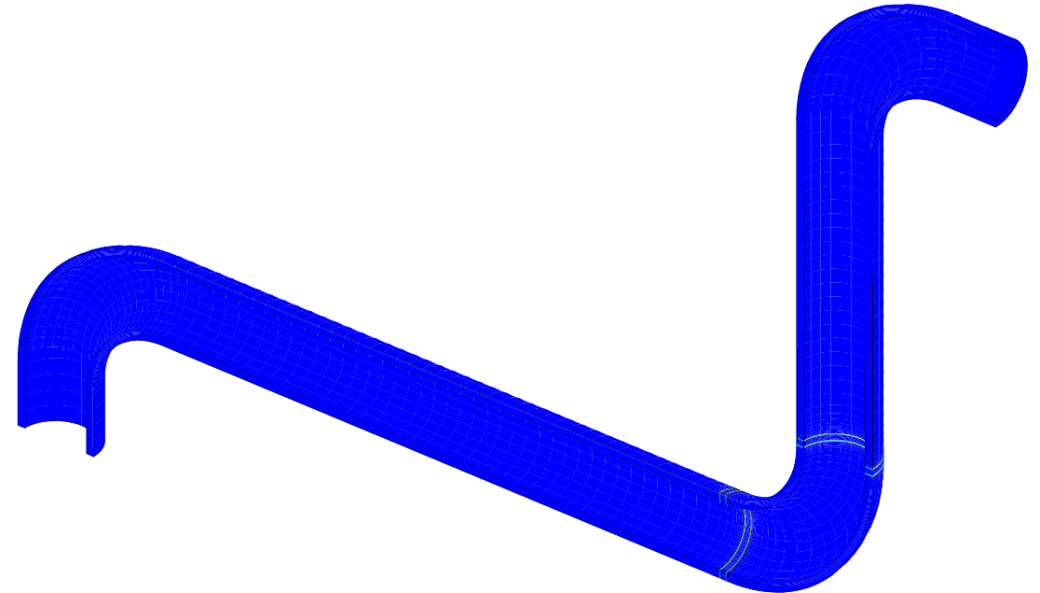
CRITÈRES DE FATIGUE
OLIGOCYCLIQUE

CONTRAINTES / DÉFORMATIONS SOUDAGE + CYCLES THERMIQUES

Contrainte axiale (XX)



Déformation plastique cumulée

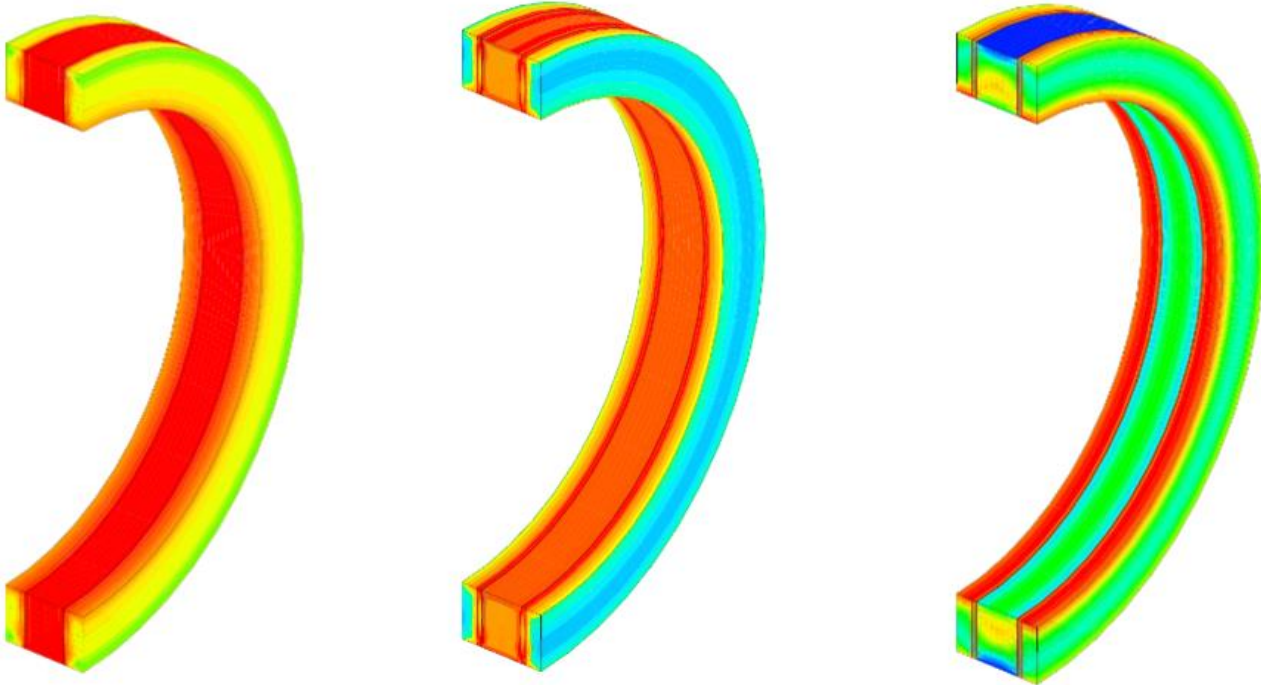


CONTRAINTES / DÉFORMATIONS APRÈS « SOUDAGE »

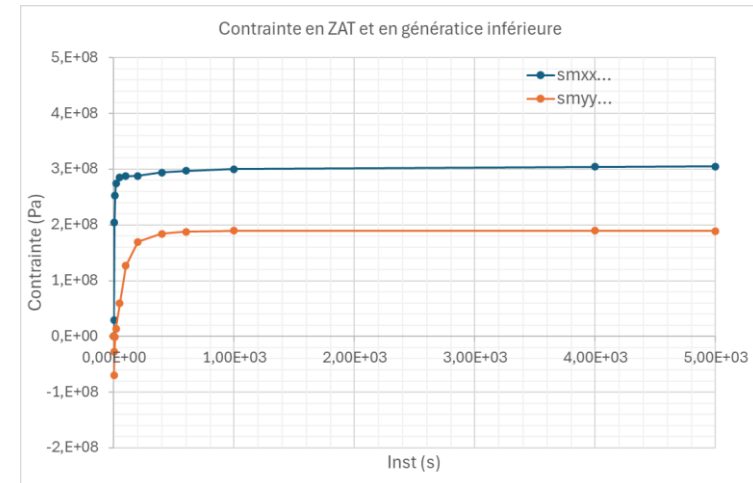
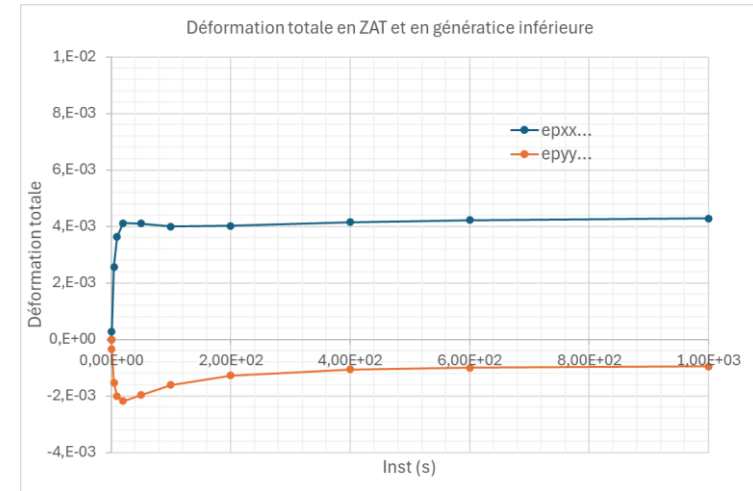
Contrainte de Von Mises

Déformation plastique cumulée

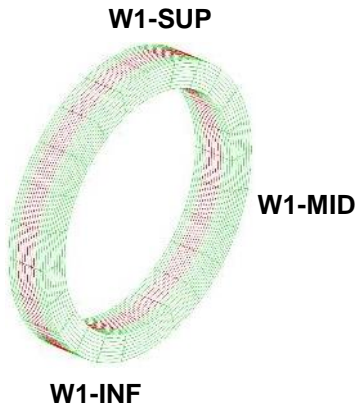
Contraintes normales à la soudure



« Soudage » → Génération d'une faible déformation plastique ($3,5e-3$) et des contraintes résiduelles de traction (~ 300 MPa) dans la peau interne des ZAT

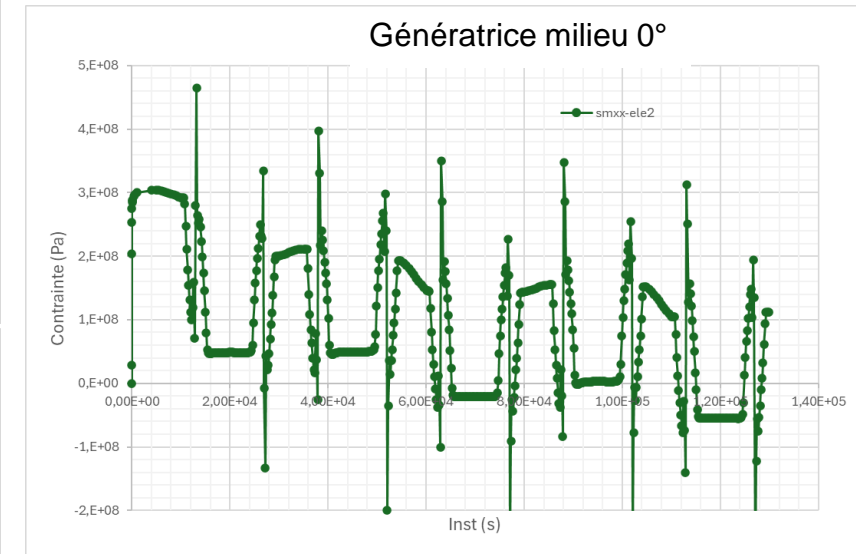
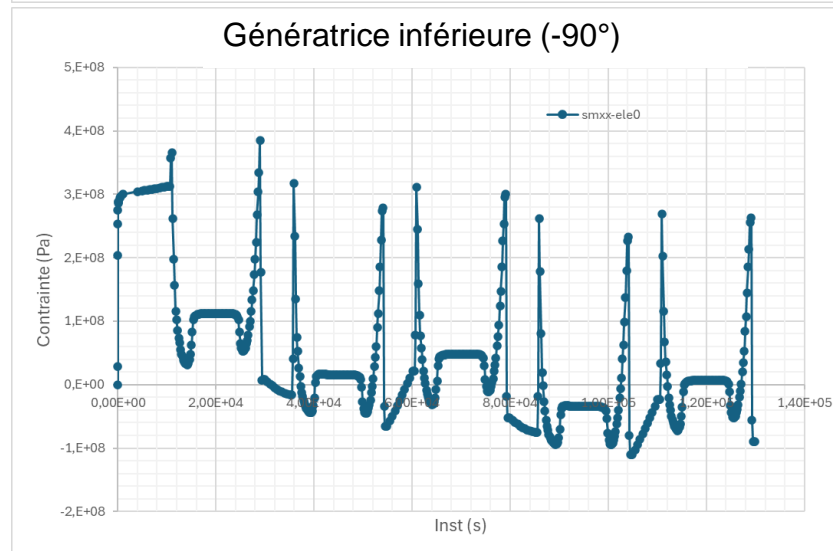
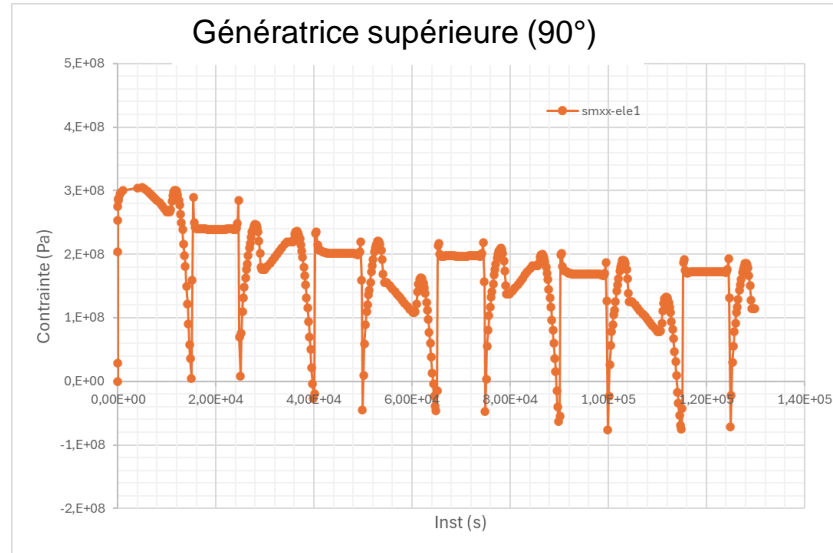


CONTRAINTE EN DIFFÉRENTS POINTS EN CIRCONFÉRENCE

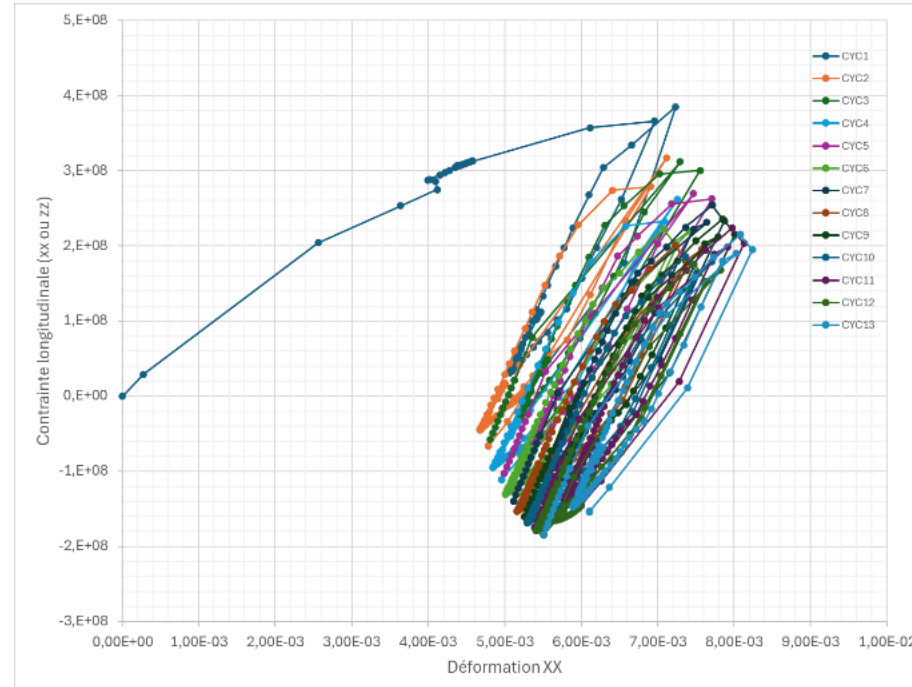


Soudure Tronçon horizontal

- Pics de contraintes lors du passage du vortex
- Les contraintes cycliques sont très différentes dans la circonférence

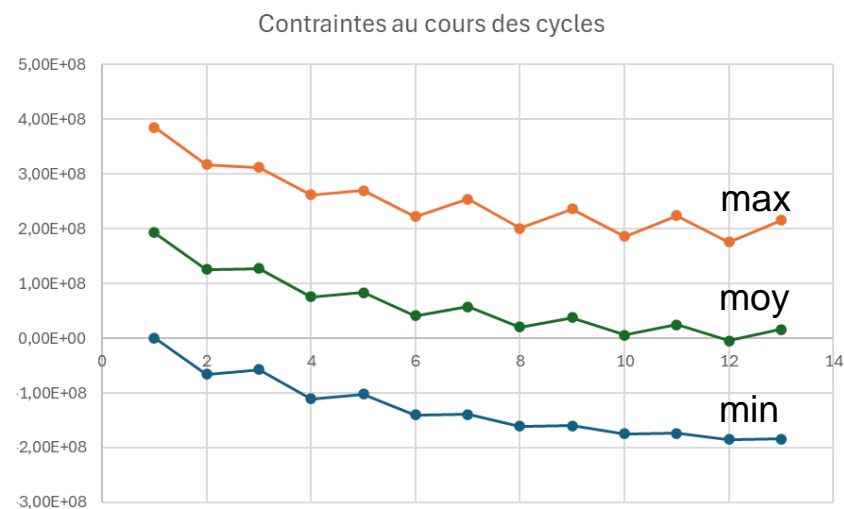
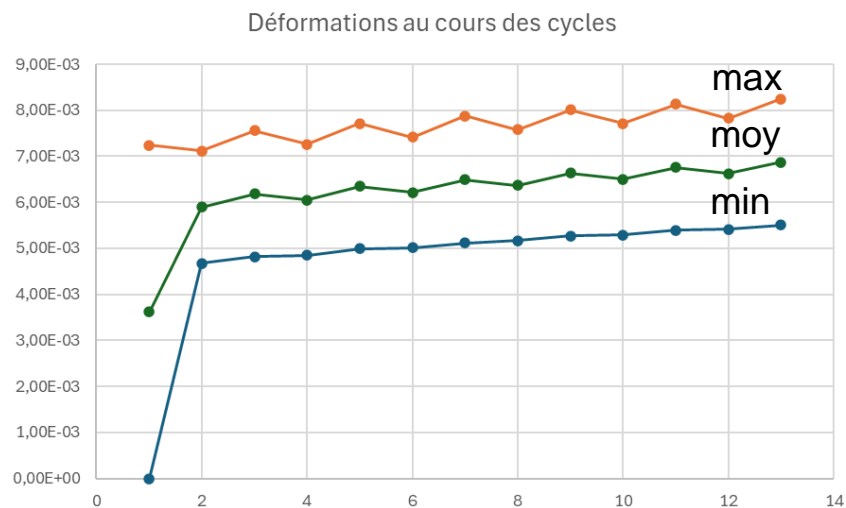


COURBE D'HYSTÉRÉSIS CONTRAINTE-DÉFORMATION



- Les contraintes sont initialement de traction mais diminuent, par la suite, au cours des cycles de chargement
- Boucles d'hystérésis pas encore complètement stabilisées au bout de 13 cycles mais leur forme reste très proche pour les derniers cycles

SOUDURE 1 – AMPLITUDE DE CONTRAINTE ET DE DÉFORMATION



- Les contraintes max – min presque stabilisées après 12 cycles
- Les déformations continuent à augmenter légèrement

SOMMAIRE

01

INTRODUCTION

02

MODÈLES AUX ÉLÉMENTS FINIS

03

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

04

CRITÈRES DE FATIGUE
OLIGOCYCLIQUE

CRITÈRES DE FATIGUE

LES CRITÈRES DE FATIGUE

Plusieurs critères donnent la relation entre un paramètre représentant le niveau d'amplitude de sollicitation (contrainte, déformation, énergie...) et le nombre de cycles conduisant à l'amorçage d'une fissure de fatigue

CRITÈRE DE MANSON – COFFIN

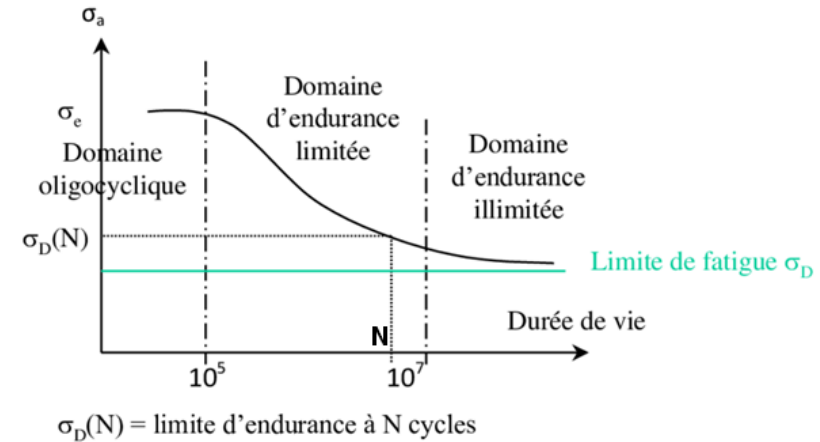
Le paramètre à considérer est l'amplitude de la déformation plastique. Ce critère est adapté pour la fatigue à faible nombre de cycles pour laquelle la déformation élastique est négligeable devant la déformation plastique

$$\Phi_{Manson-Coffin} = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$$

CRITÈRE DE MANSON – COFFIN - BASQUIN

Critère s'appuyant sur l'amplitude de la déformation totale. Adapté pour la fatigue à faible ou à grand nombre de cycles

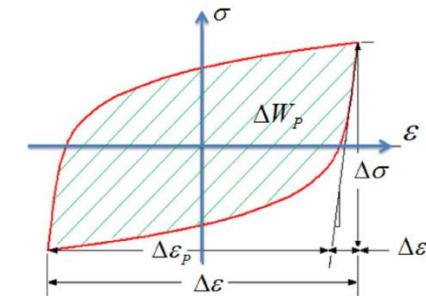
$$\Phi_{Manson-Coffin-Basquin} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$$



CRITÈRE DE L'ÉNERGIE DISSIPÉE

Critère s'appuyant l'énergie dissipée pendant le cycle de chargement ΔW_p

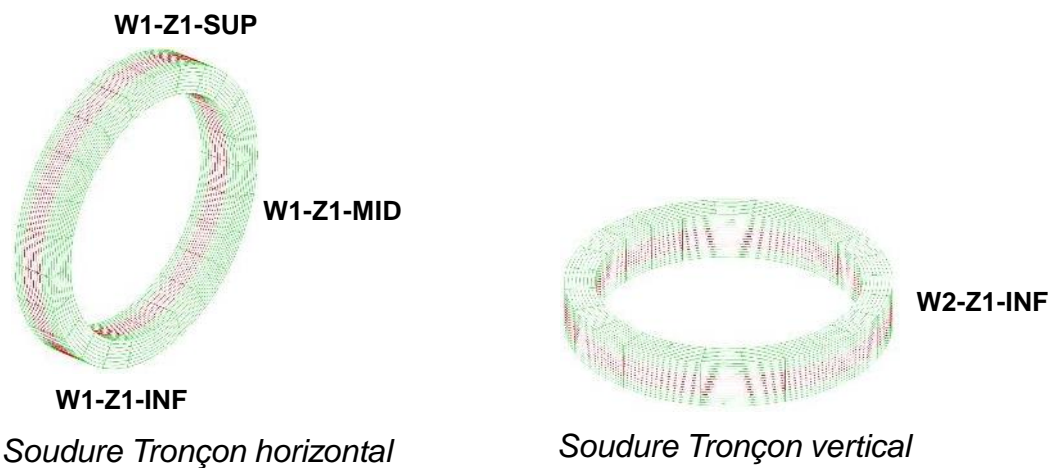
$$\Phi_{\text{Energie Dissipée}} = W_{\text{Dissipée}} = \int_{\text{cycle}} \sigma : \dot{\varepsilon}^p dt$$



COURBE RCC-M DE FATIGUE DES ACIERS INOXYDABLES

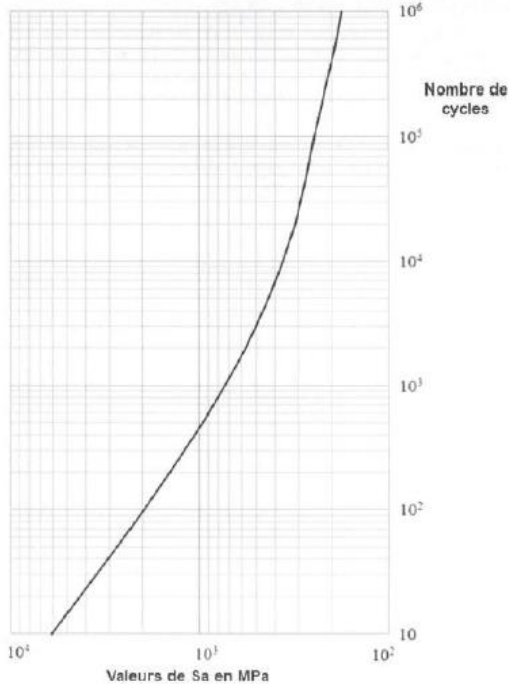
LES CRITÈRES DE FATIGUE (Z I 4.2)

Le critère du RCC-M donne la relation entre l'amplitude de contrainte S_a et le nombre de cycles de fatigue. Dans les analyses élastoplastiques, l'amplitude de contrainte (fictive) est déduite à partir de l'amplitude de déformation en utilisant la valeur de $E = 17,9.10^4$ MPa



	Soud. 1 INF	Soud. 1 SUP	Soud. 1 MIL	Soud. 2
Déformation (variation totale)	2,96E-03	3,27E-03	3,21E-03	3,10E-03
Amplitude de déformation	1,48E-03	1,64E-03	1,61E-03	1,55E-03
Amplitude équiv. de contr. (MPa)	264	293	288	277
Nombre de cycles de fatigue	6,01E+04	3,01E+04	3,35E+04	4,24E+04
Années (hyp. 5 cycles/jour)	32,9	16,5	18,4	23,2

Amp. S_a	Nb_Cycles
177	1,00E+06
193	5,00E+05
223	2,00E+05
248	1,00E+05
270	5,00E+04
313	2,00E+04
362	1,00E+04
432	5,00E+03
573	2,00E+03
735	1,00E+03
968	5,00E+02
1437	2,00E+02
1975	1,00E+02
2745	5,00E+01
4304	2,00E+01
6088	1,00E+01



ANALYSE

L'analyse selon le critère du RCC-M conduit à estimer un risque de fatigue pour un fonctionnement entre 16 ans à 32 ans de fonctionnement

Le risque de fatigue est légèrement plus élevé pour les génératrices supérieure et médiane que pour la génératrice inférieure

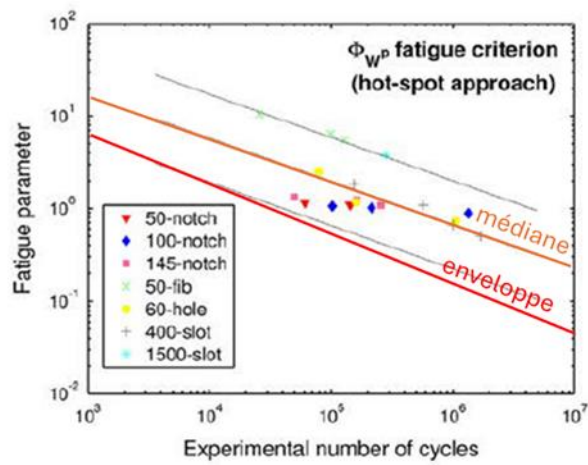
CRITÈRE SUR L'ÉNERGIE DISSIPÉE

DONNÉES ISSUES DE AURICCHIO ET AL.

Courbe de fatigue des éprouvettes entaillées à l'ambiance qui donne le nombre de cycles de fatigue en fonction de l'énergie dissipée par cycle W_p

$$\Phi_{Energie\ Dissipée} = W_{Dissipée} = \int_{cycle} \sigma : \dot{\epsilon}^p dt$$

Fatigue aciers 316L à T_{amb} , Auricchio et al.



RÉSULTATS DE PRÉVISION DE FATIGUE

	Soud. 1 INF	Soud. 1 SUP	Soud. 1 MIL	Soud. 2
Energie dissipée W_p (MPa)	0,72	0,83	1,17	0,68
Nombre de cycles de fatigue	3,65E+04	2,73E+04	1,35E+04	4,10E+04
Années (hyp. 5 cycles/jour)	20,0	15,0	7,4	22,5

ANALYSE

Les prédictions donnent des durées de vie légèrement plus courtes que selon le critère RCC-M

Les résultats confirment une nocivité plus élevée pour la génératrice supérieure que pour la génératrice inférieure

Toutefois, ce critère en énergie dissipée montre que la génératrice médiane dans la soudure n°1 présente le risque de fatigue le plus élevé

PERSPECTIVES

ANALYSE DE FATIGUE : PLUSIEURS HYPOTHÈSES DEVRONT ÊTRE VÉRIFIÉES ET CONFIRMÉES

Une meilleure description des chargements de vortex et de stratification thermique

- Températures max, min
- Gradient de température dans le vortex et dans la zone stratifiée
- Cinétique d'évolution du vortex
- Nombre de cycles...

Prise en compte d'autre chargements thermomécaniques, des fluctuations de température locale plus rapides

Analyse de la propagation des fissures par fatigue

Effet de l'état du matériau dans la ZAT : effet des contraintes résiduelles, des pré-déformations... sur le risque d'amorçage et de propagation par fatigue

EFFET DES CHARGEMENTS DE FLUCTUATION (LENTE) SUR LES PRÉVISIONS DE L'AMORÇAGE ET DE LA PROPAGATION DES FISSURES DE CSC