

Prévision de l'amorçage d'une fissure de fatigue dans des assemblages soudés pour applications navales



¹



²

Laboratoire Bretois de Mécanique et des Systèmes
EA 4325

C. Erny ^{1,2}, D. Thevenet ¹, J-Y. Cognard ¹, M. Körner ²

25 mars 2010

Caractère multi-échelle de la fatigue

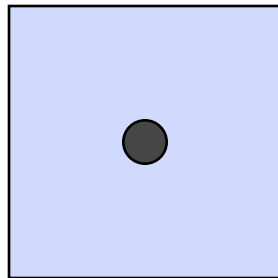
Dimensionnement
fatigue à grand
nombres de cycles



Echelle du navire

sollicitation cyclique
d'amplitude constante
ou variable

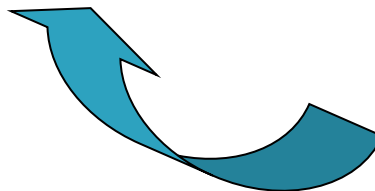
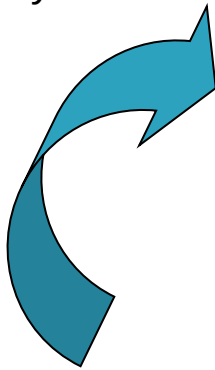
Echelle du matériau
modèle de fatigue à
deux échelles



Echelle de l'assemblage soudé

concentration de contrainte en
pied de cordon

hétérogénéité des propriétés
mécaniques



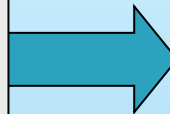
Objectif & démarche

Outil de dimensionnement à la fatigue

Calcul de structure

(éléments finis)

- géométrie du cordon
- comportement élasto-plastique non linéaire
- hétérogénéité matériau
- chargements « complexes »
- contraintes résiduelles



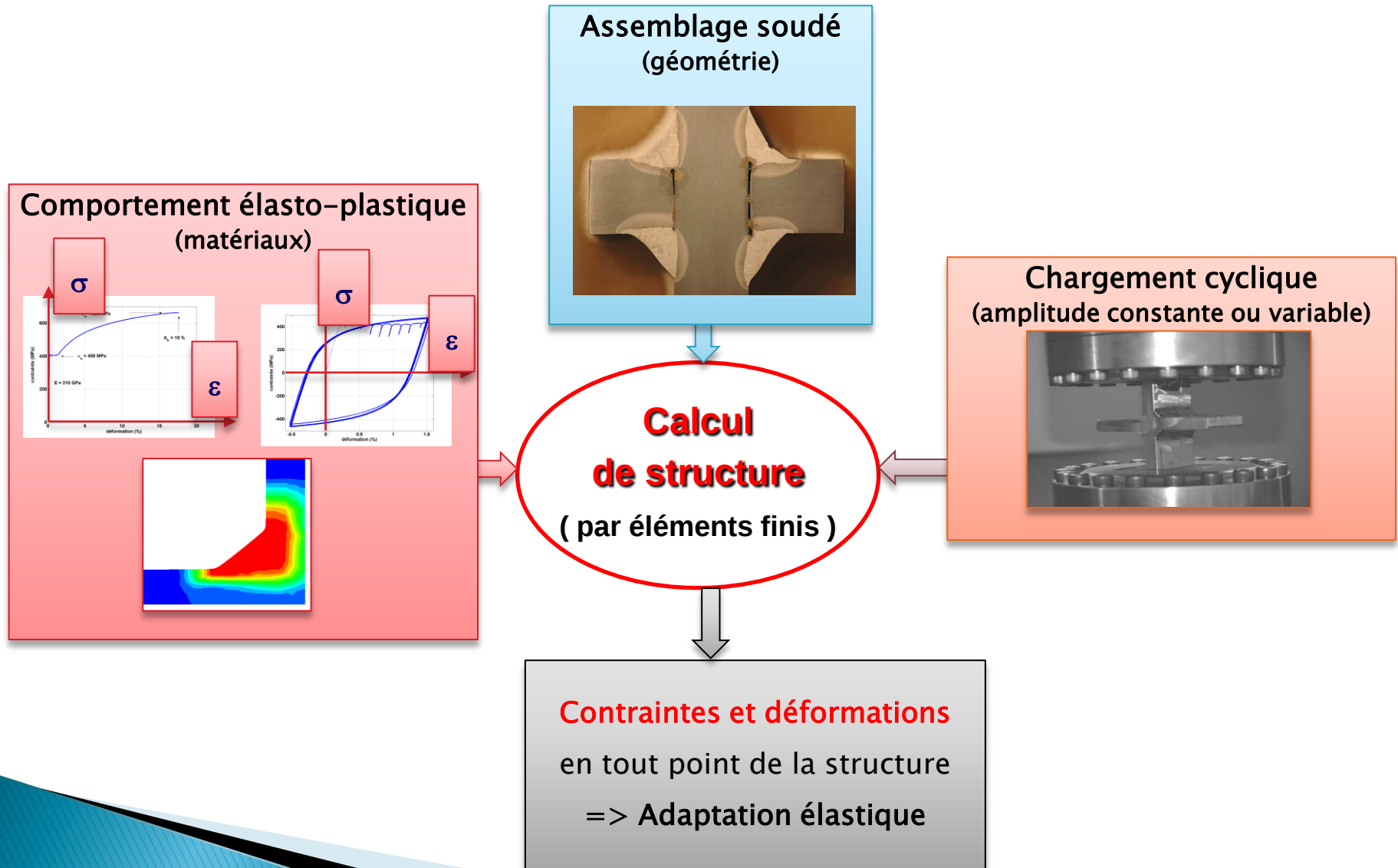
Calcul durée de vie

(post-traitement)

- modèle d'endommagement à deux échelles
- propriétés à la fatigue
- hétérogénéité matériau

1. CALCUL DE STRUCTURE

Démarche du calcul de structure



Métal de base et HAZ

- ▶ Métal de base
 - étude des comportements monotone et cyclique
- ▶ Zone d'amorçage de fissures de fatigue
 - pied de cordon
 - limite du métal fondu et de la HAZ
 - dureté élevée
- ▶ HAZ simulée
 - Application d'un traitement thermique au métal de base (DCNS)
 - maintien 24 min. à 1000°C
 - refroidissement à l'huile
 - Etude des comportements monotone et cyclique
 - nouveaux paramètres d'écrouissage

Comportements en traction (BM, HAZ)

► Composition chimique (BM) : acier DH36

C	Mn	P	S	Si	Al
0,18	1,60	0,035	0,035	0,50	0,02



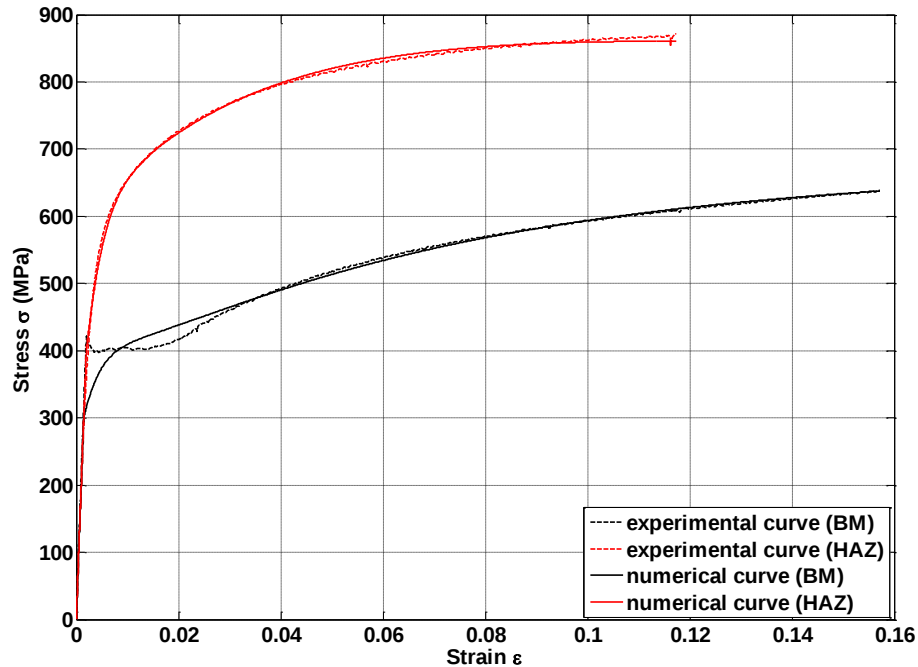
► Comportements cyclique et monotone (BM), $H_v=200$

- limite d'élasticité monotone : 400 MPa
- limite d'élasticité cyclique : 205 MPa

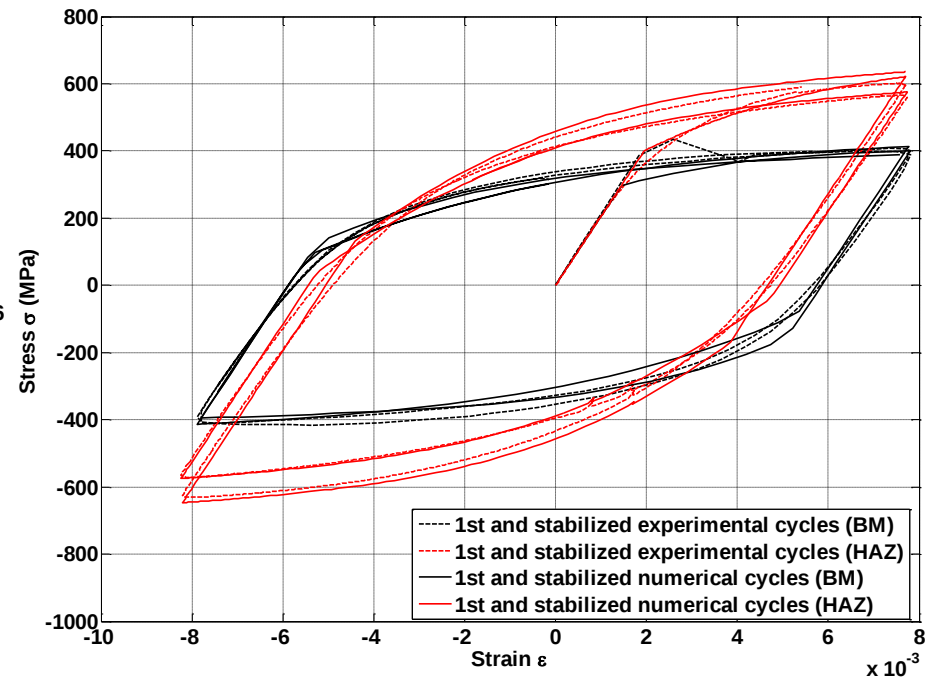
► Comportements cyclique et monotone (HAZ), $H_v=275$

- limite d'élasticité monotone : 500 MPa
- limite d'élasticité cyclique : 315 MPa

Lois de comportement (BM, HAZ)



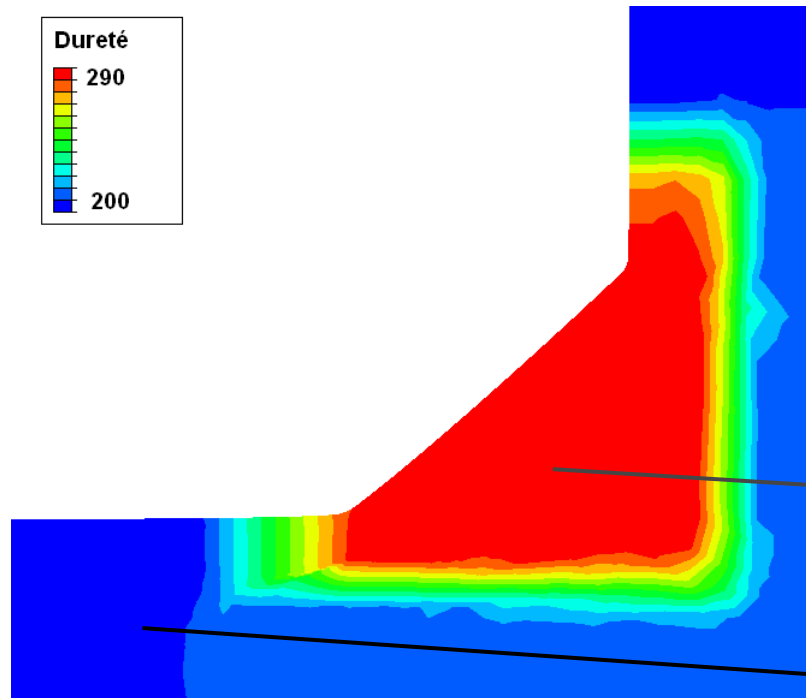
Comportement monotone
(BM, HAZ)



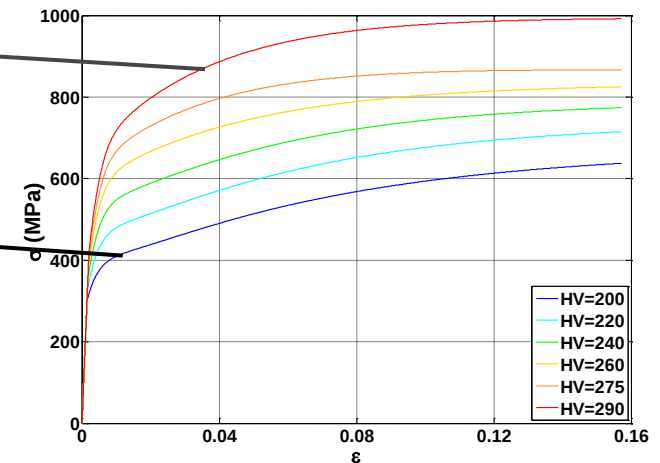
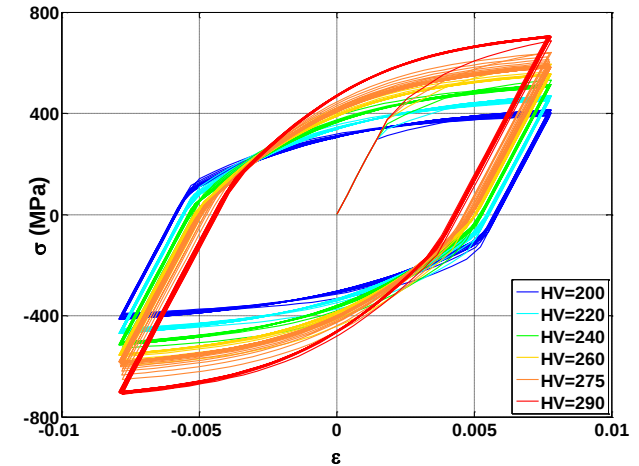
Comportement cyclique
(BM, HAZ)

Hétérogénéité des propriétés mécaniques

- ▶ Relation affine entre μ -dureté et paramètres d'écrouissage
- ▶ Validation par essais de μ -indentation (en cours)



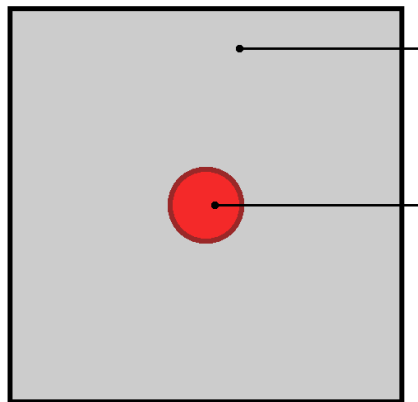
Joint cruciforme (1/4 échantillon)



2. CALCUL DE DUREE DE VIE

Modèle de fatigue : deux échelles (1 / 3)

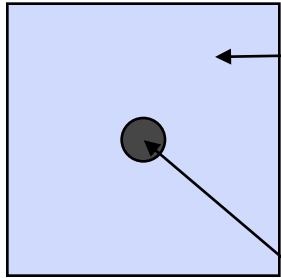
- ▶ Modèle de prévision de durée de vie
- ▶ Domaine d'application
 - adaptation élastique de la structure
 - fatigue à grand nombre de cycles
 - utilisation pour des chargements complexes (Lemaitre et al.)
- ▶ Modèle à deux échelles



**Matrice élastique
(échelle mésoscopique)**

**Inclusion élasto-plastique endommageable
(échelle microscopique)**

Modèle de fatigue : deux échelles (2 / 3)



matrice élastique $\underline{\underline{\mathbf{E}}}^e = \underline{\underline{\mathbf{E}}} = \frac{(1+\nu)}{E} \underline{\underline{\Sigma}} - \frac{\nu}{E} \text{Tr}(\underline{\underline{\Sigma}}) \underline{\underline{\mathbf{1}}}$



localisation $\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\mathbf{E}}} + \beta \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}^p$ avec $\beta = \frac{2}{15} \frac{4-5\nu}{1-\nu}$

inclusion élastoplastique endommageable

Elasticité

$$\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}^e = \frac{(1+\nu)}{E} \underline{\underline{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}} - \frac{\nu}{E} \text{Tr}(\underline{\underline{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}}) \underline{\underline{\mathbf{1}}} \quad \text{avec} \quad \underline{\underline{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}} = \frac{\underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}}{(1-d)}$$

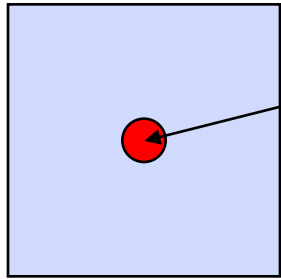
Plasticité

$$f = (\underline{\underline{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}} - \underline{\underline{\mathbf{x}}})_{eq} - \sigma_f$$

○ Paramètre matériau

$$\dot{\underline{\underline{\mathbf{x}}}} = \frac{2}{3} C (1-d) \dot{\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}}^p$$

Modèle de fatigue : deux échelles (3/3)



inclusion élastoplastique endommageable

Endommagement

seuil d'endommagement

$$p_D = \varepsilon_{pD} \left[\frac{\sigma_u - \sigma_f}{\sigma_{eq}^{\max} - \sigma_f} \right]^m$$

loi d'évolution

$$\dot{d} = \left(\frac{y}{S} \right)^s \dot{p}$$

si

$$p \geq p_D$$

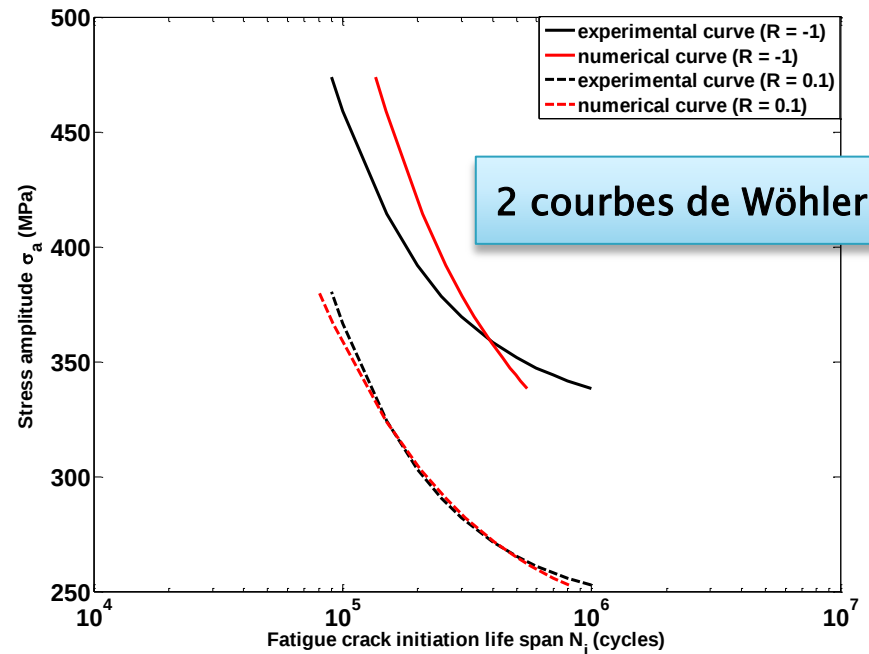
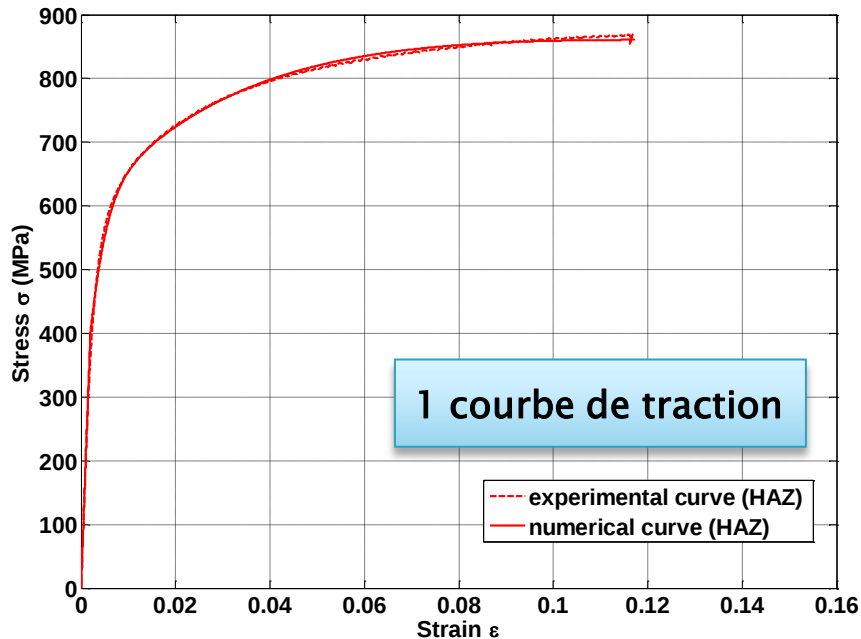


Paramètre matériau

avec

$$y = \frac{1+\nu}{2E} \left[\frac{\text{Tr}(\langle \tilde{\underline{\underline{\sigma}}} \rangle_+^2)}{(1-d)^2} + h \frac{\text{Tr}(\langle \tilde{\underline{\underline{\sigma}}} \rangle_-^2)}{(1-hd)^2} \right] - \frac{\nu}{2E} \left[\frac{\langle \text{Tr}(\tilde{\underline{\underline{\sigma}}}) \rangle^2}{(1-d)^2} - h \frac{\langle -\text{Tr}(\tilde{\underline{\underline{\sigma}}}) \rangle^2}{(1-hd)^2} \right]$$

Paramètres du modèle de fatigue (HAZ)



E	205 000 MPa
ν	0,30
C	2 500 MPa
σ_u	870 MPa

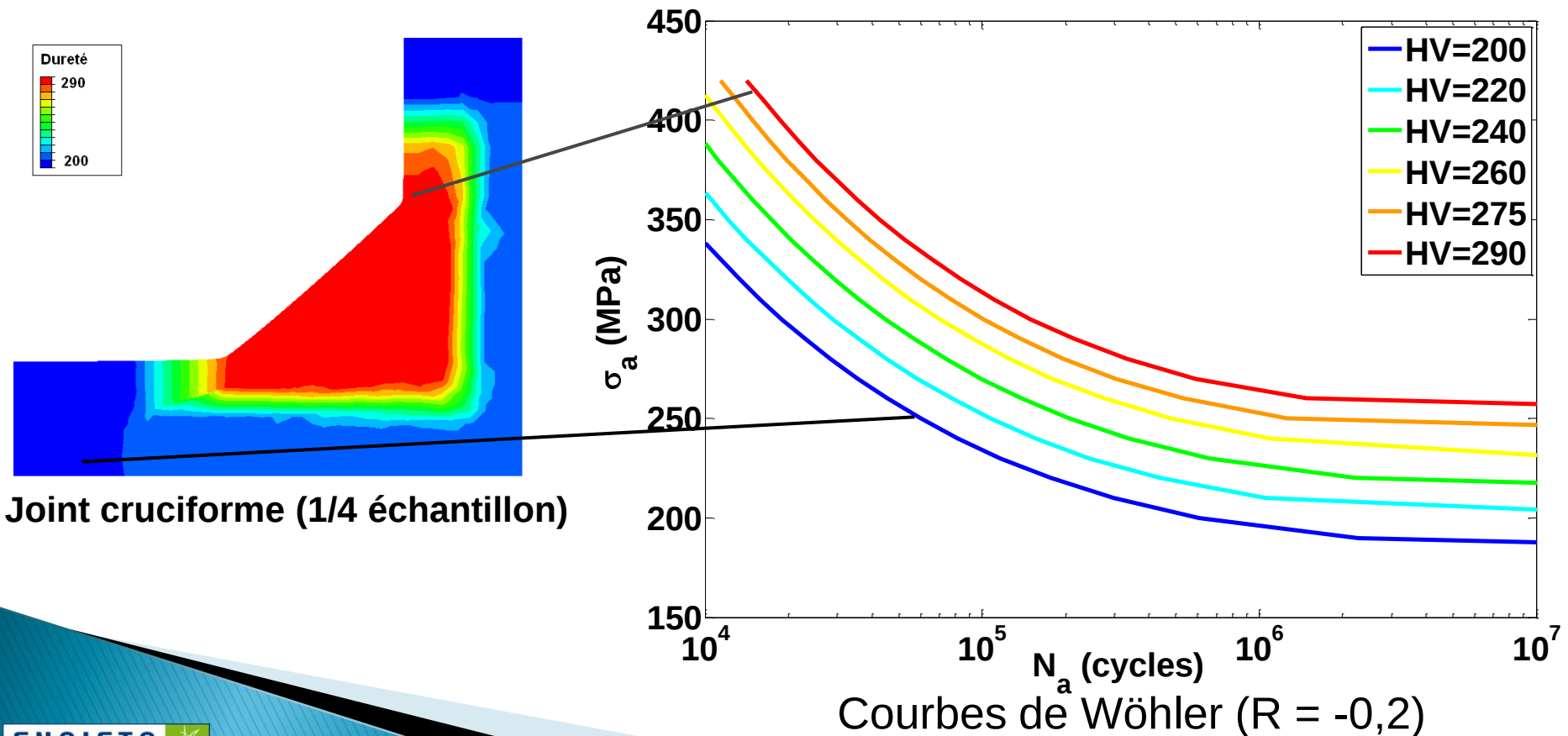
fixés

h	0,20
d_{1c}	0,30

σ_f	230 MPa
ε_{pD}	0,02
m	1,85
S	200
s	0,84

Hétérogénéité des propriétés à la fatigue

- ▶ Relation affine entre μ -dureté et paramètres du modèle de fatigue
- ▶ Prédiction de courbes de Wöhler (rapport de charge quelconque)

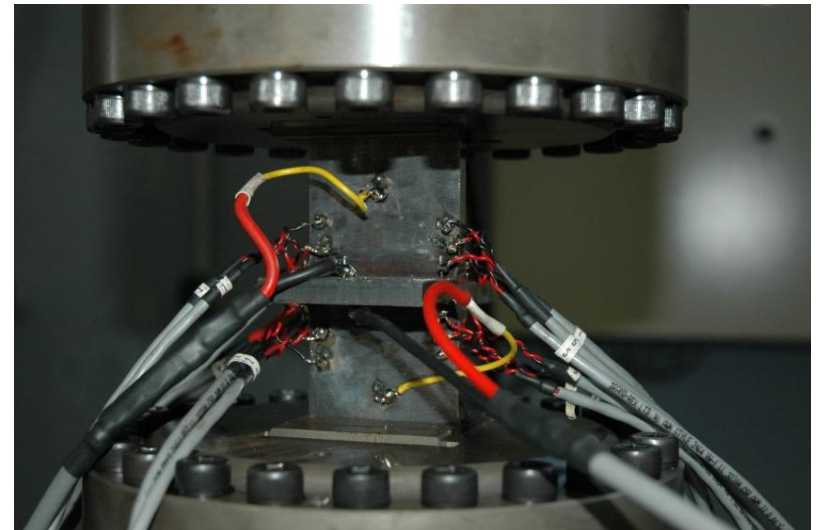
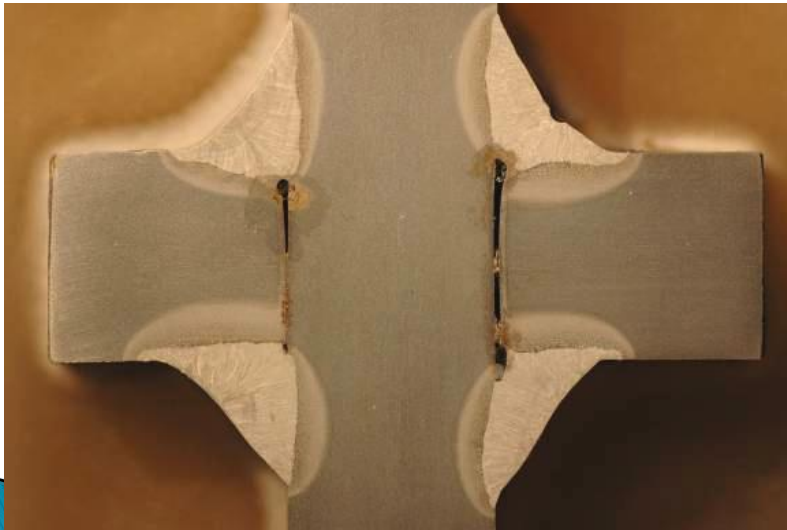


3. ESSAIS DE FATIGUE

Joint cruciforme

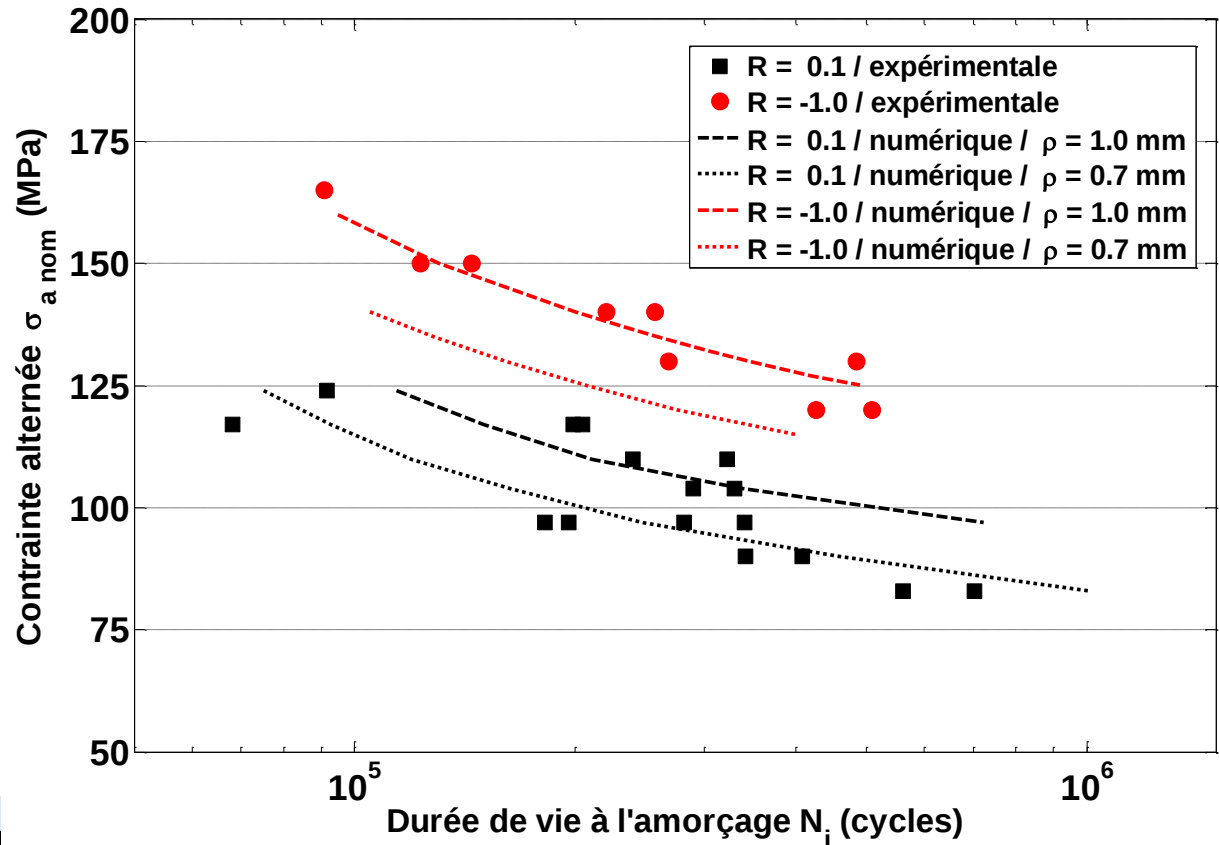
Joint cruciforme : définition et essai

- ▶ Procédé de soudure : MAG semi-automatique
- ▶ Épaisseur de panneau : 8 mm
 - Joints cruciformes à âme continue
 - Application d'un traitement de détentionnement
 - Sollicitations : traction – compression et traction ondulée
- ▶ Dispositif de suivi de fissure (ACPD)
 - Taille détectée : 500 μm



Joint cruciform : durée de vie

- ▶ Mesure par capteur laser (WISC) du profil de joint soudé
- ▶ Identification de géométries représentatives
 - rayon de raccordement (ρ) : 0,7 et 1,0 mm
 - angle de raccordement : 45°
 - profondeur de gorge : 3,5 et 4,0 mm

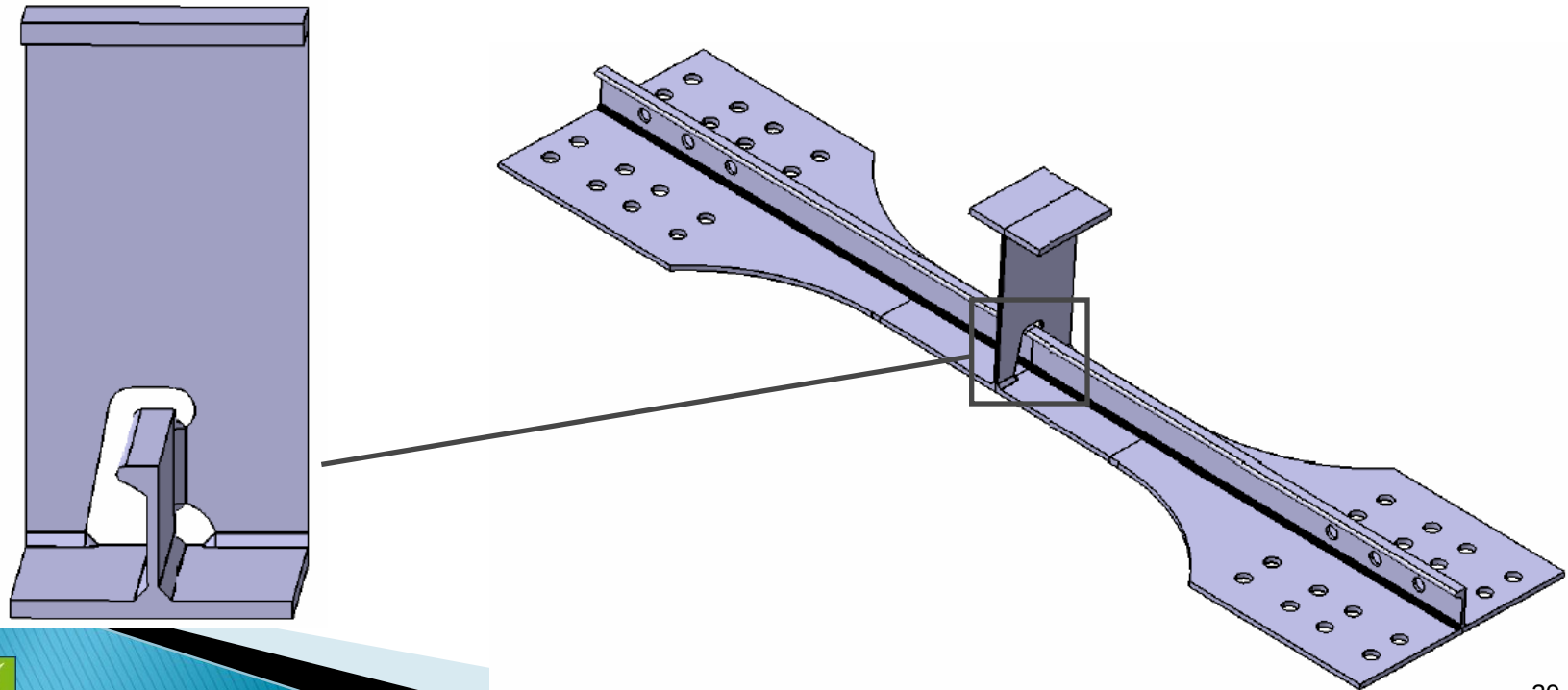


3. ESSAIS DE FATIGUE

Détail structural

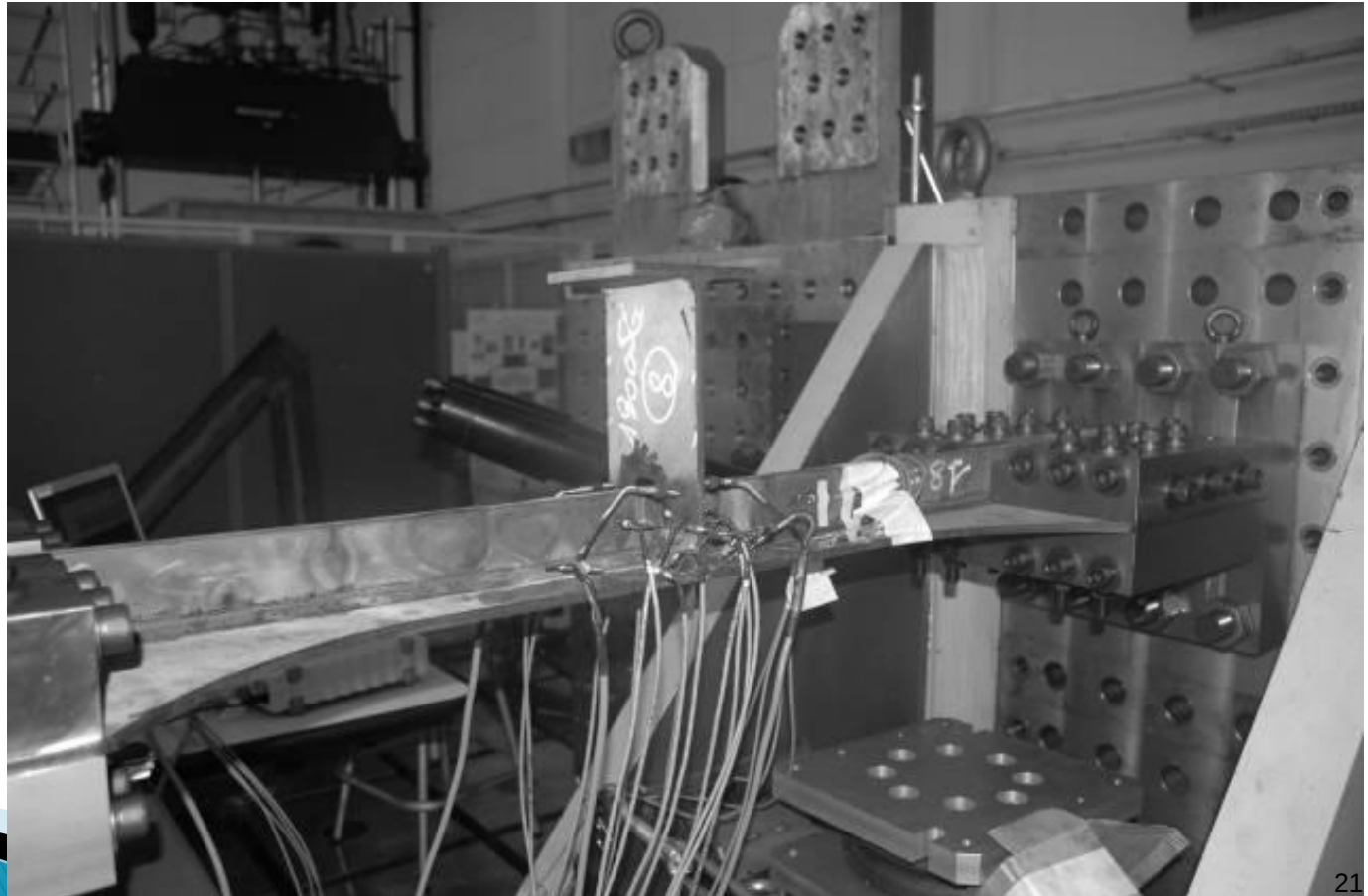
Détail structural : définition

- ▶ Panneau muni de deux raidisseurs
 - 1 lisse
 - 1 varangue
 - dimensions : 1500 x 130 x 8 mm³
- ▶ Détail structural
 - rencontré sur bâtiment de surface
 - détensionnée par traitement thermique (DCNS)

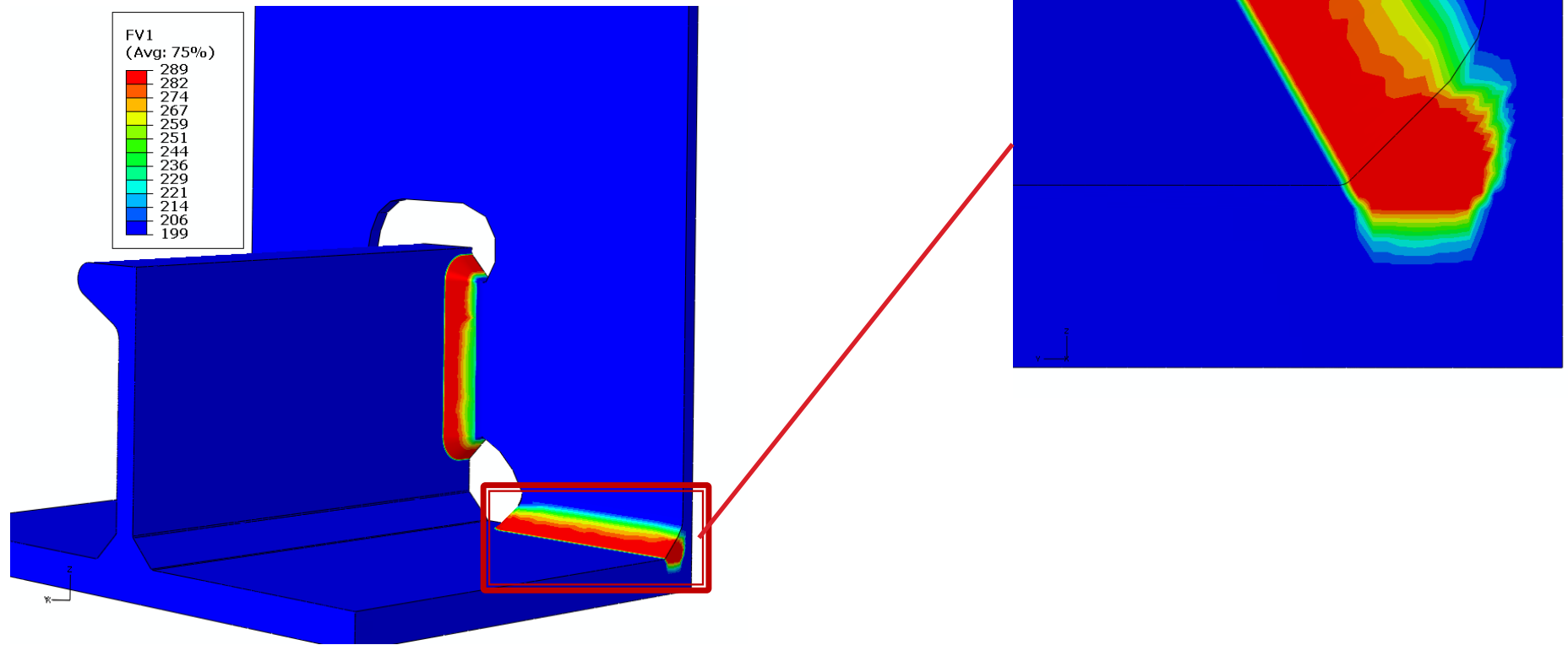


Détail structural : essai de fatigue

- ▶ Plate-forme multiaxiale de fatigue (ENSIETA)
 - utilisation d'un vérin de 400 kN à 5 Hz ($R = 0,1$)
- ▶ Dimensionnement du détail structural
- ▶ Conception d'un système d'ancrage (liaison vérin-assemblage)

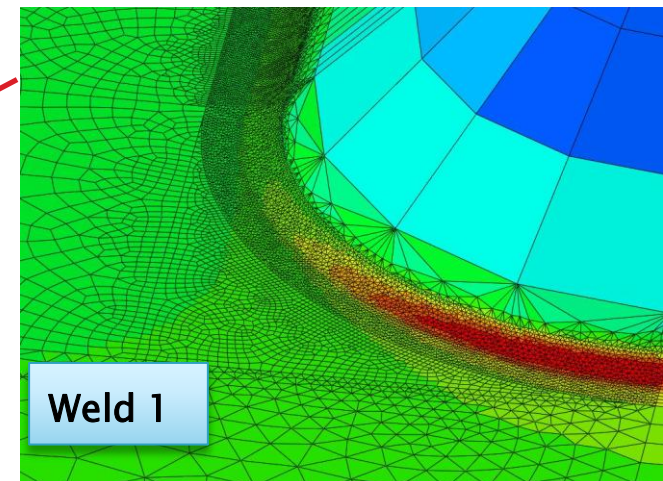
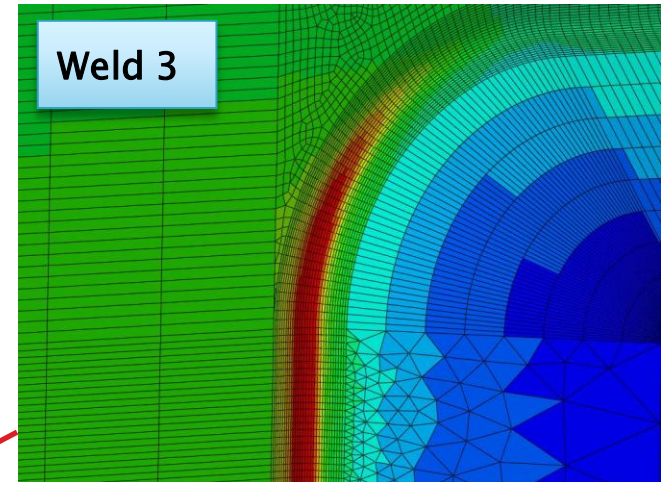
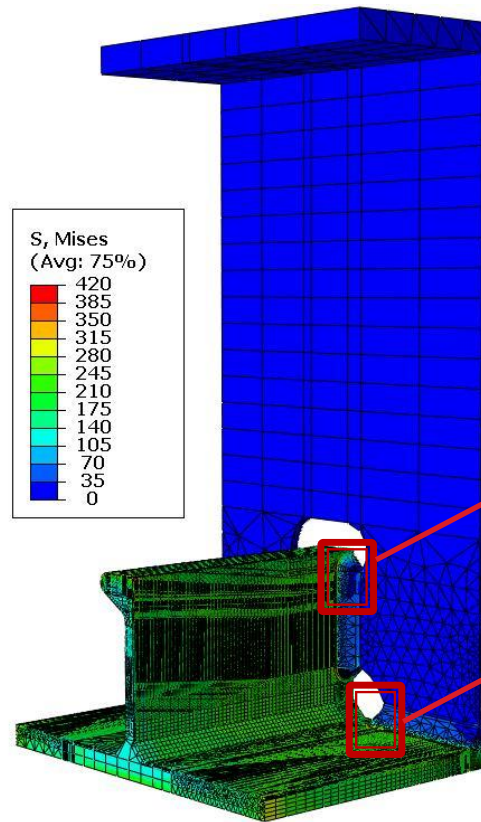


Détail structural : champ de dureté



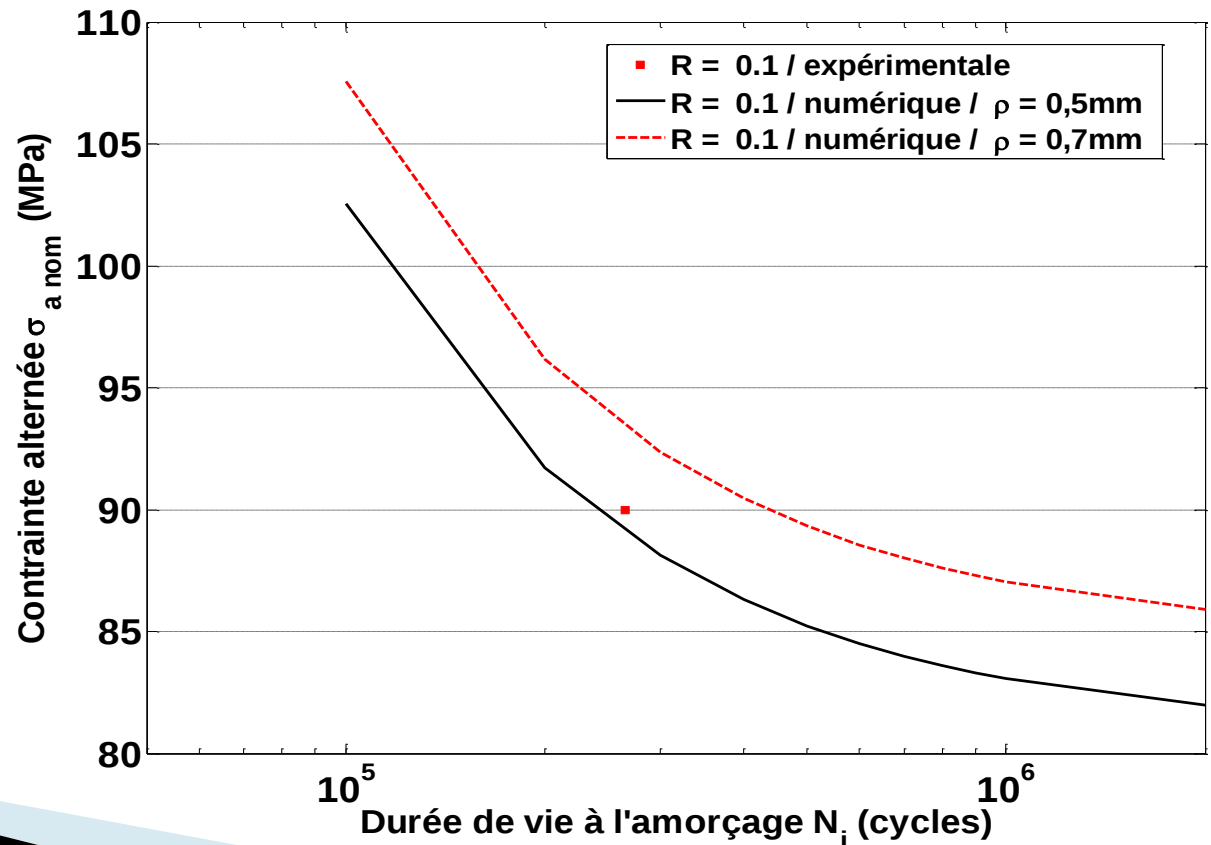
Détail structural : calcul élasto-plastique

- Localisation de la zone d'amorçage de fissures
 - état de contrainte multi-axial
 - haut de la liaison soudée lisse / varangue
 - pied de cordon tôle / varangue



Détail structural : durée de vie

- ▶ Mesure par capteur laser du profil du joint soudé
- ▶ Identification de deux géométries représentatives
 - rayon de raccordement (ρ) : 0,5 mm et 0,7 mm
 - angle de raccordement : 45°
 - profondeur de gorge : 4 mm



Conclusions

- ▶ Méthode de prévision de la durée de vie en fatigue
 - Analyse de l'adaptation de la structure (comportement non linéaire)
 - Analyse de la durée de vie en fatigue (post-traitement)
- ▶ Différents paramètres
 - Chargement
 - amplitude constante + variable (non présentée)
 - Géométrie (concentration de contrainte)
 - angle et rayon de raccordement
 - Propriétés des matériaux (BM, HAZ)
 - comportement mécanique et propriétés à la fatigue
- ▶ Joints cruciformes
 - 30 éprouvettes soudées
 - 2 rapports de charge (0,1 et -1)
- ▶ Détails structuraux
 - 8 panneaux (1500 x 130 x 7 mm³) munis de raidisseurs croisés
 - 2 rapports de charge (0,1 et 0,3)

Prévision de l'amorçage d'une fissure de fatigue dans des assemblages soudés pour applications navales



C. Erny^{1,2}, D. Thevenet¹, J-Y. Cognard¹, M. Körner²

25 mars 2010

Lois de comportement

► Modèle d'écrouissage de type Lemaitre et Chaboche

$$f = \left(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}}_1 - \underline{\underline{X}}_2 \right)_{eq} - R_1 - \sigma_y \leq 0 \qquad \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \frac{3}{2} \frac{\underline{\underline{\sigma}}' - \underline{\underline{X}}_1' - \underline{\underline{X}}_2'}{\left(\underline{\underline{\sigma}} - \underline{\underline{X}}_1 - \underline{\underline{X}}_2 \right)_{eq}} \dot{p}$$

- 2 écrouissages cinématiques (X_1, X_2)

$$\underline{\underline{\dot{X}}}_1 = \frac{2}{3} C_1 \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p - \gamma_1 \underline{\underline{X}}_1 \dot{p}$$

- prise en compte de l'adoucissement : modèle de Marquis

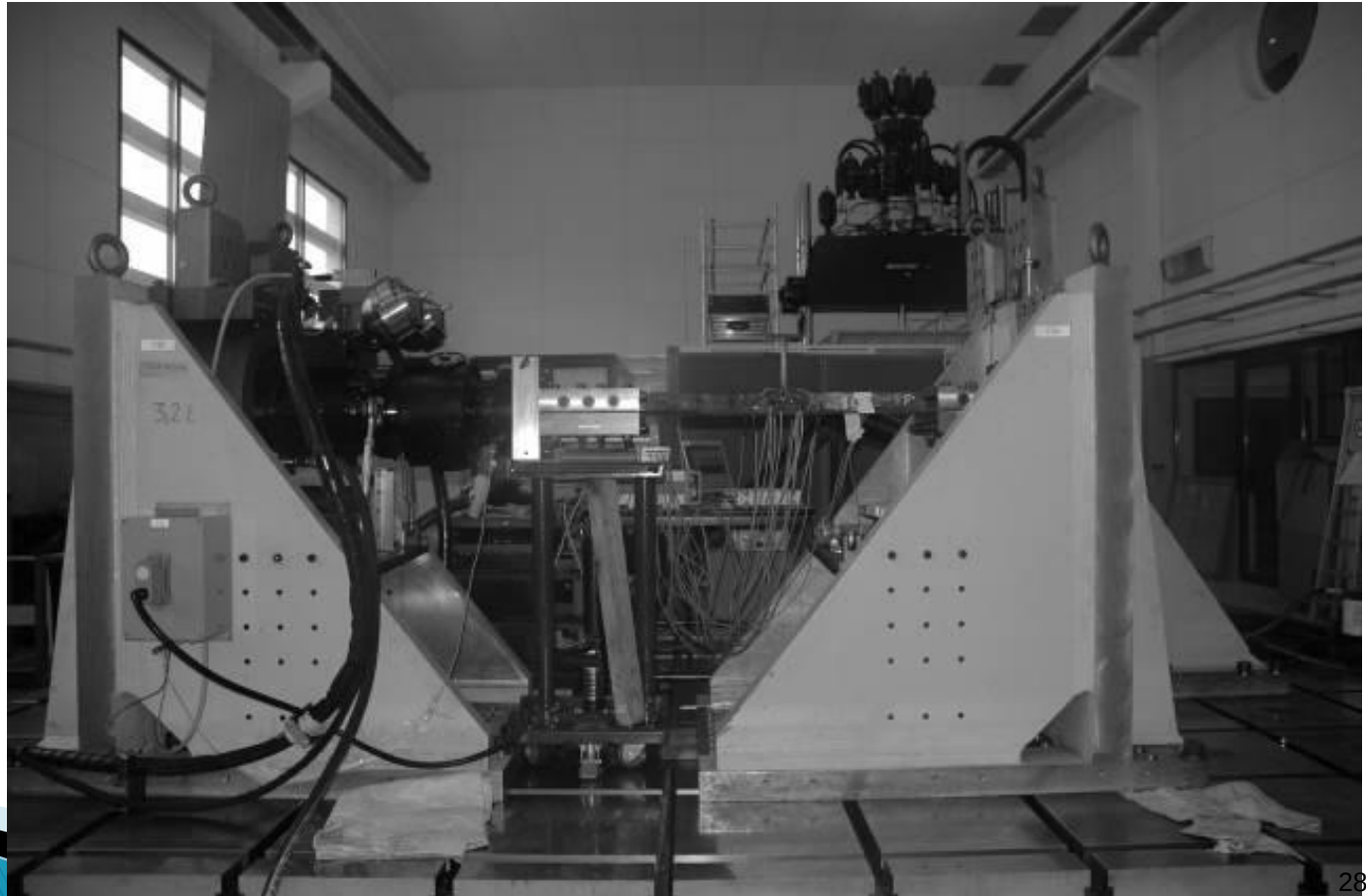
$$\underline{\underline{\dot{X}}}_2 = \frac{2}{3} C_2 \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p - \gamma_2(p) \underline{\underline{X}}_2 \dot{p} \quad \text{avec} \quad \gamma_2(p) = \varphi_\infty + \psi e^{-w \cdot p}$$

- 1 écrouissage isotrope (R)

$$\dot{R} = b (Q - R) \dot{p}$$

Détail structural : essai de fatigue

- ▶ Plate-forme multiaxiale de fatigue (ENSIETA)
 - utilisation d'un vérin de 400 kN à 5 Hz ($R = 0,1$)
- ▶ Dimensionnement du détail structural
- ▶ Conception d'un système d'ancrage (liaison vérin-assemblage)



Essai de μ -indentation

