

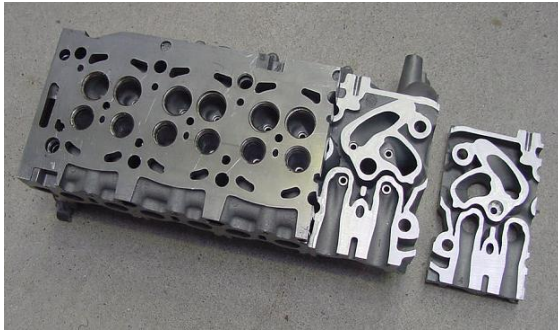
# Effet des fortes contraintes hydrostatiques sur la tenue en fatigue des matériaux métalliques

I. Koutiri<sup>a</sup>, D. Bellett<sup>b</sup>, F. Morel<sup>b</sup>

a) Arts et métiers ParisTech(Paris)

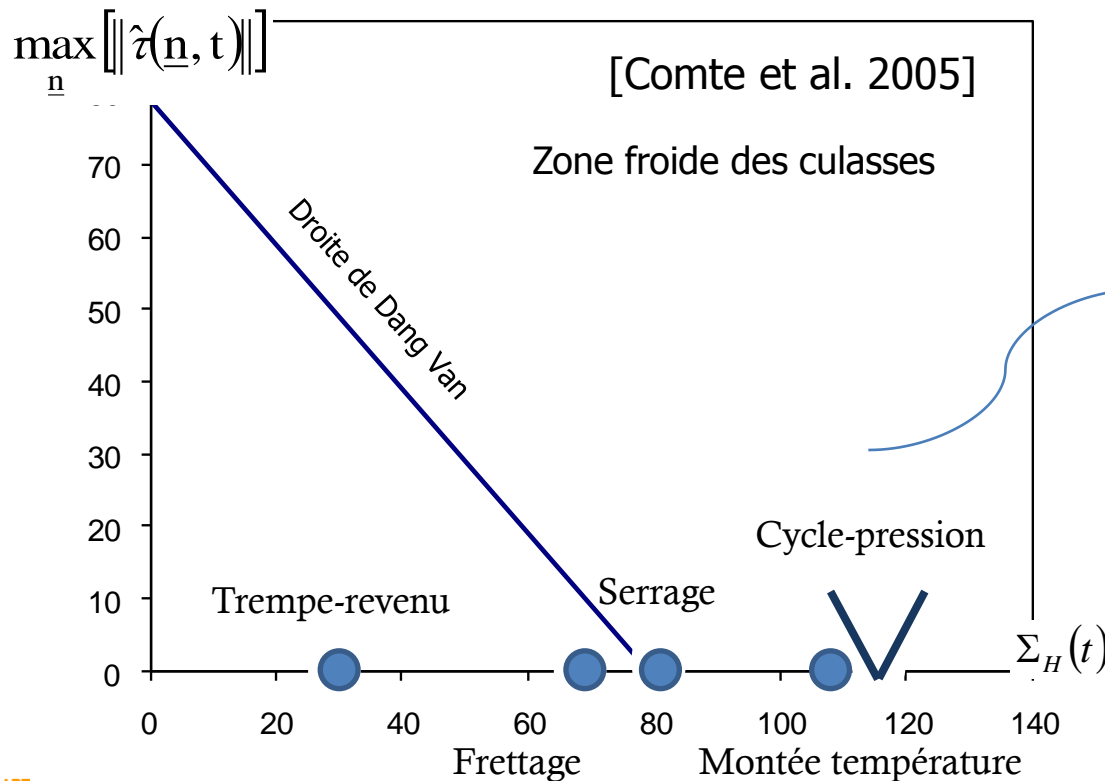
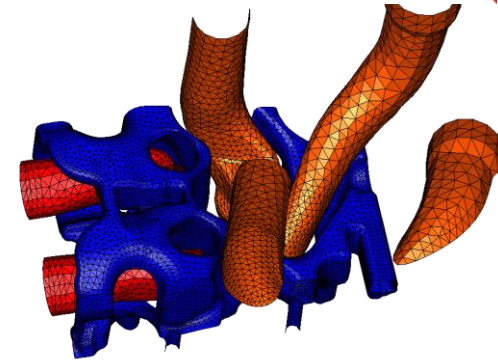
b) Arts et métiers ParisTech(Angers), LAMPA

# Contexte industriel



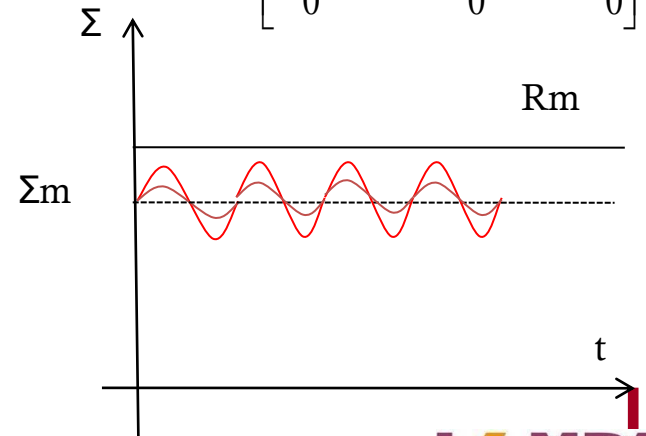
Culasse automobile (moteur diesel) de la société PSA

Noyau d'eau Admission Échappement



Chargement de traction biaxiale avec forte contrainte moyenne

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11}(t) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_{22}(t) = k\Sigma_{11}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

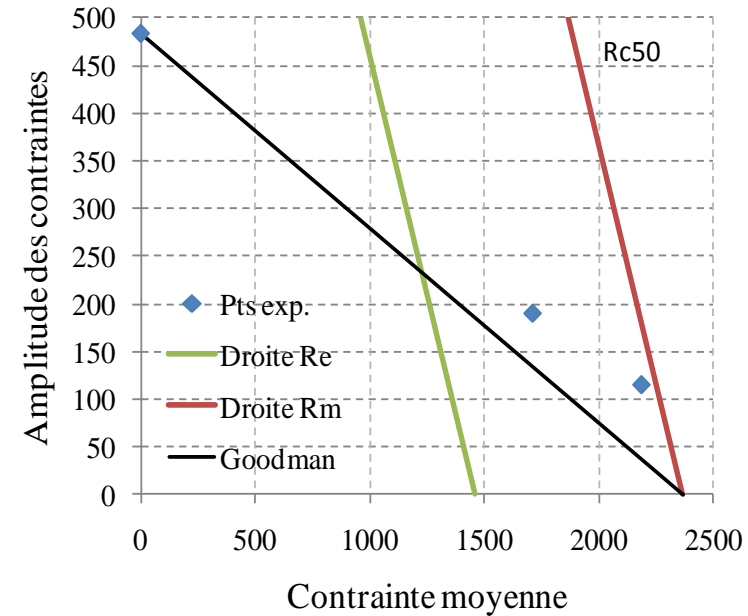
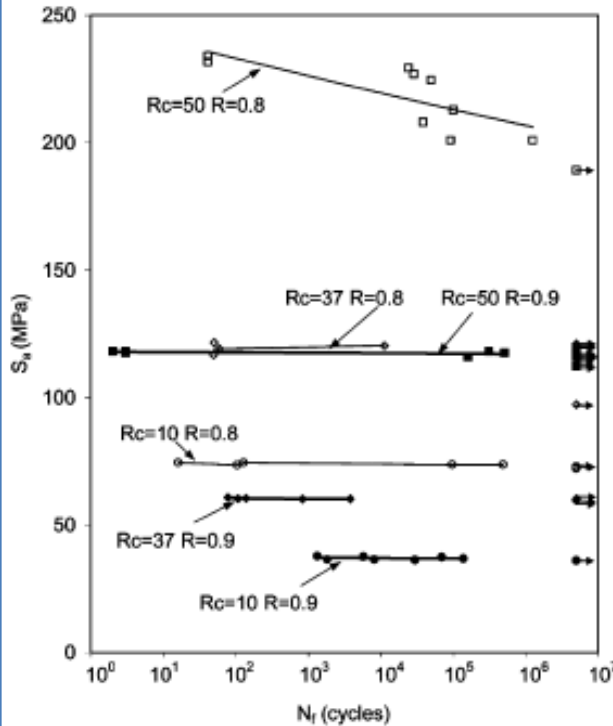
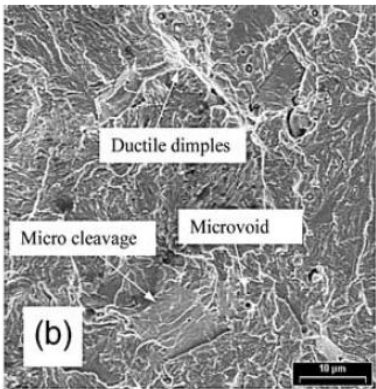
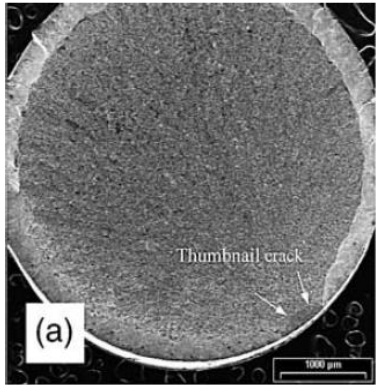


# Fatigue en présence d'endommagement [Karadag et al. 2003]

Matériau : Acier SAE 1045 (différents traitements thermiques)

Rapport de charge  $R=0.8$  et  $0.9$

Sollicitation : Traction uniaxiale

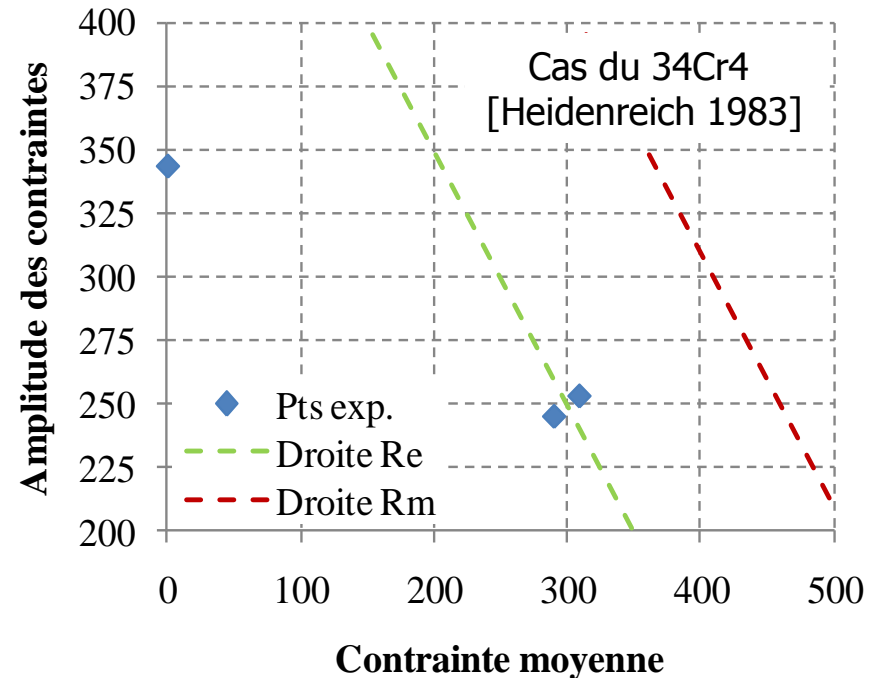
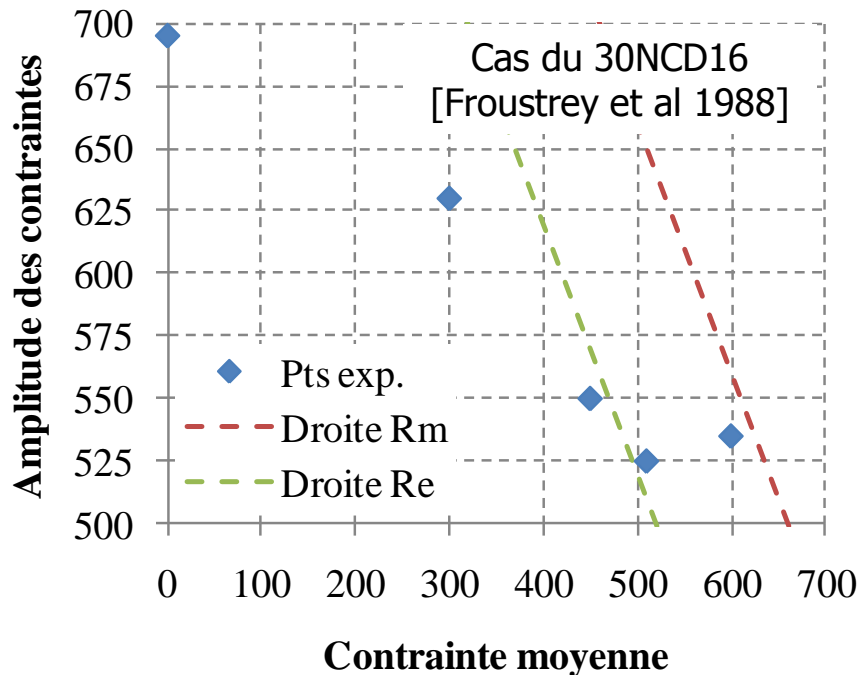


Amplitude proche entre faible et grand nombre de cycles  
Limite de fatigue du matériau proche de sa limite à rupture  $R=0.9$  (Cas du Rc50)

Rc 50 ( $R=0.8$ )

# Effet bénéfique de la moyenne - fort rapport de charge

Augmentation de l'amplitude des contraintes

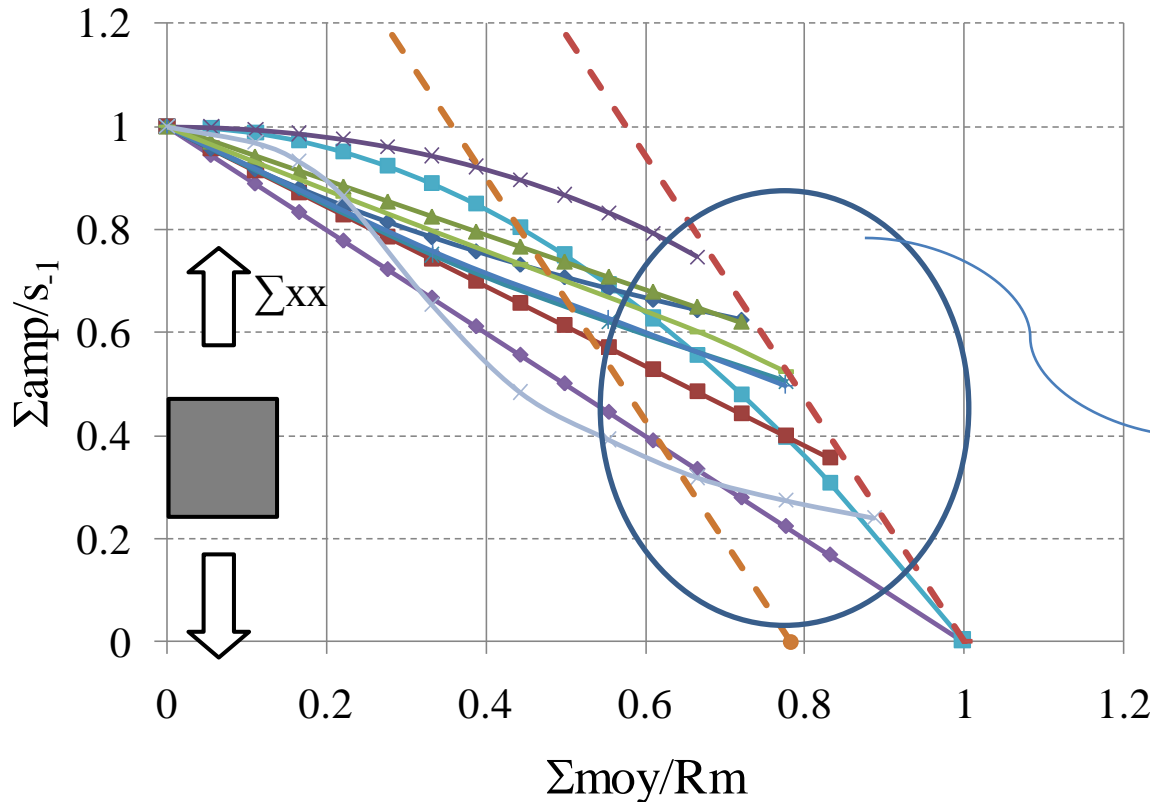


- Sollicitation de flexion-torsion et des faibles rapports de charge
- Peu informations : cas des forts rapports de charge et effets de biaxialité

Modélisations existantes ? Cas des forts rapports de charge et effets de biaxialité

# Modélisation des effets de moyenne - cas uniaxial

Matériau : 34CrMo4 [Baier 1970]					
$t_{-1}$	$s_{-1}$	$s_0$		$R_m$	$Re$
284 MPa	382 MPa	600 MPa		902 MPa	706 MPa



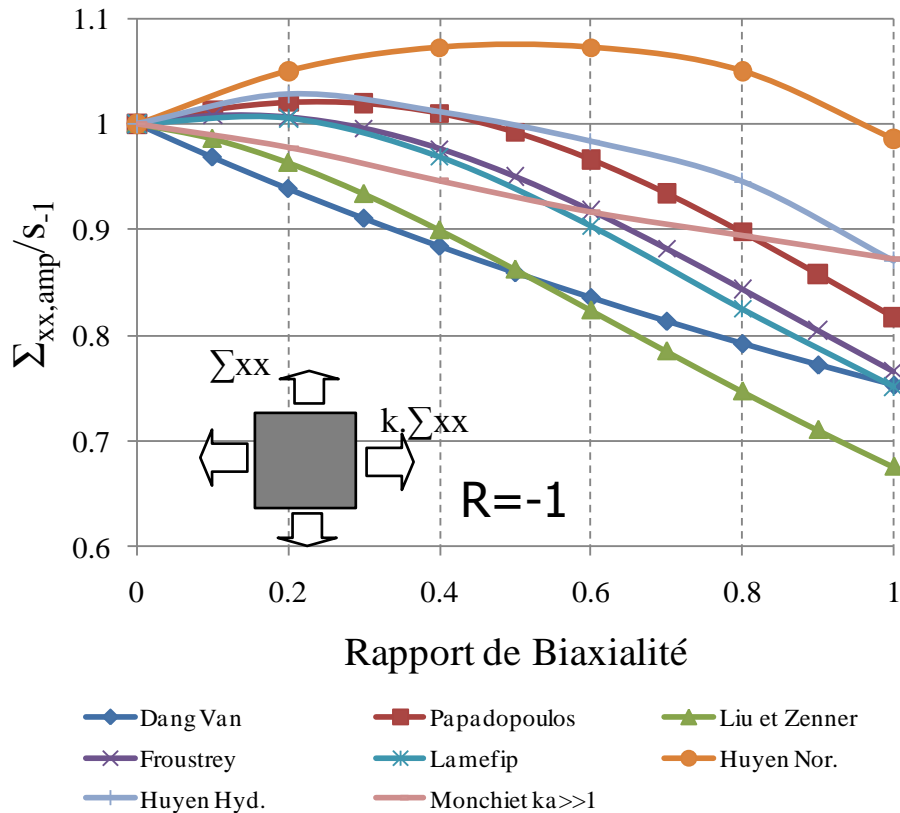
Disparité des prédictions des modélisations

Tendances légèrement différentes

Validité des critères dans le cas de fortes contraintes moyennes ?

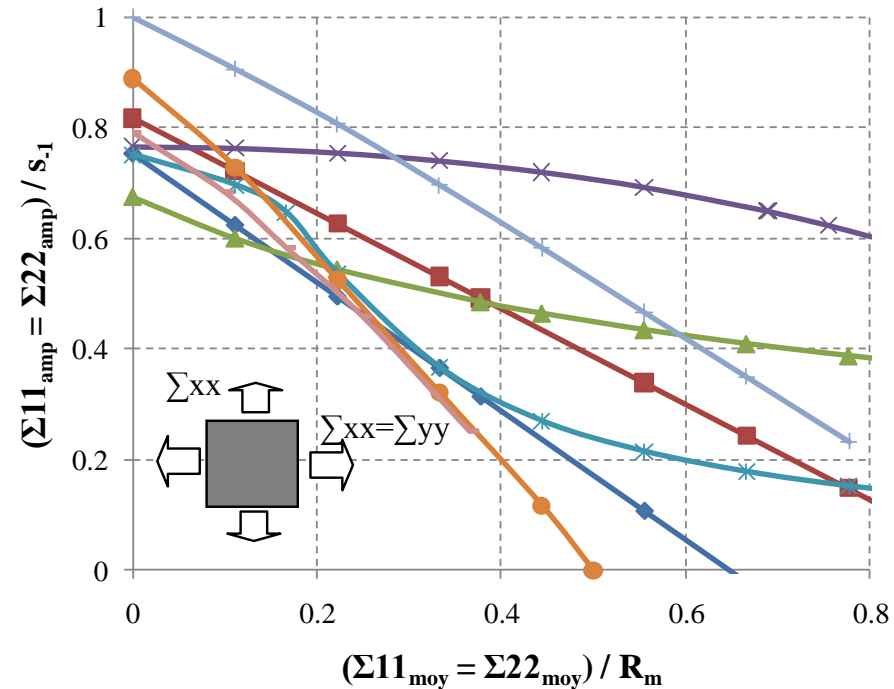
- ◆ Goodman
- Gerber
- Dang Van
- ◆ Liu et Zenner
- ▲ Papadopoulos
- × Froustrey
- \* Huyen Nor.
- + Huyen hyd.
- Monchiet  $ka \gg 1$
- × Lamefip
- Limite d'élasticité
- Limite à rupture

# Modélisation des effets de biaxialité



Effet du rapport de biaxialité

- Effet du rapport de biaxialité ?  
néfaste ou bénéfique



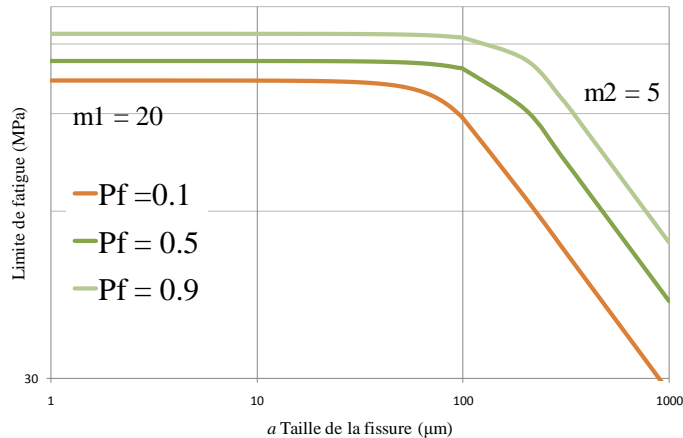
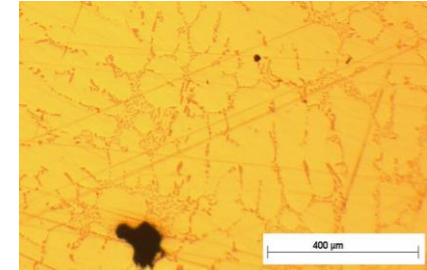
Effet de biaxialité et de contrainte moyenne

- Effet de moyenne et tendance ?

# Objectifs scientifiques

- Caractériser le comportement en fatigue de l'alliage d'aluminium de fonderie : Rôle des hétérogénéités microstructurales : effet de moyenne (forts rapports de charge) et de biaxialité

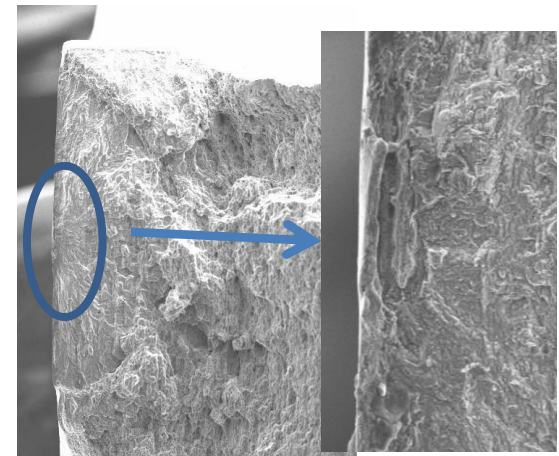
- ✓ **Biaxialité = Traction biaxiale**
- ✓ **Chargements affines radiales**



- Modéliser les effets de moyenne et de biaxialité de l'alliage d'aluminium de fonderie (adapté aux mécanismes observés).

- Prendre en compte l'effet du dommage sous fortes valeurs moyennes

- Caractérisation des mécanismes d'amorçage
- Modélisation proposée



# Plan

## **I. Comportement et mécanismes d'amorçage en fatigue uniaxiale et biaxiale avec contrainte moyenne**

- Chargement uniaxial : Flexion plane et torsion
- Chargement multiaxial : Traction équilibiaxiale
- Analyse des effets de moyenne et de biaxialité

---

## II. Modélisation probabiliste de l'effet des hétérogénéités microstructurales (cas de l'AlSi7Cu05Mg03)

- Mécanisme 1 : Mésoplasticité
- Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture



# Matériau : AlSi7Cu05Mg03

	Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn
Min (%)	-	6,50	0,40	0,28	-	-	-	0,08	-	-
Max(%)	0,20	7,50	0,60	0,35	0,10	0,10	0,05	0,20	0,05	0,05

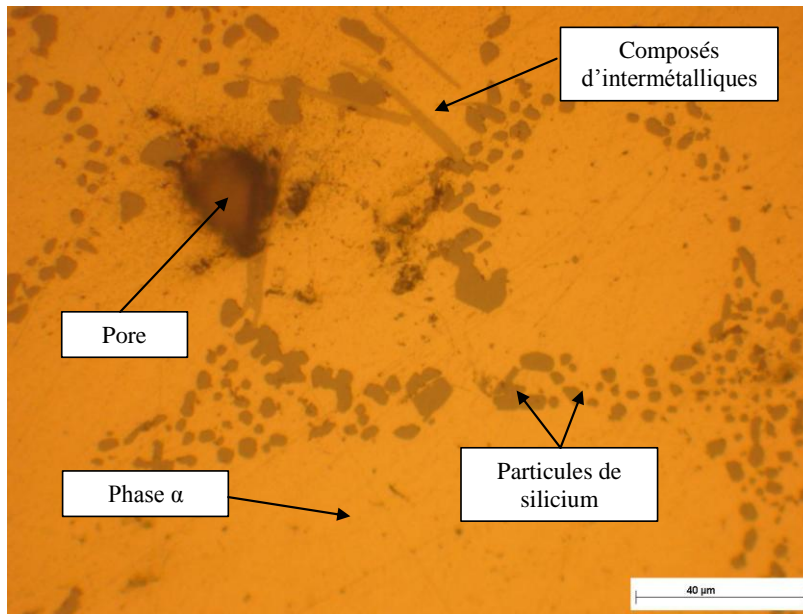
Traitement thermique T7

DAS = 80  $\mu\text{m}$

$\text{Re}_{0.2}$  = 251 MPa

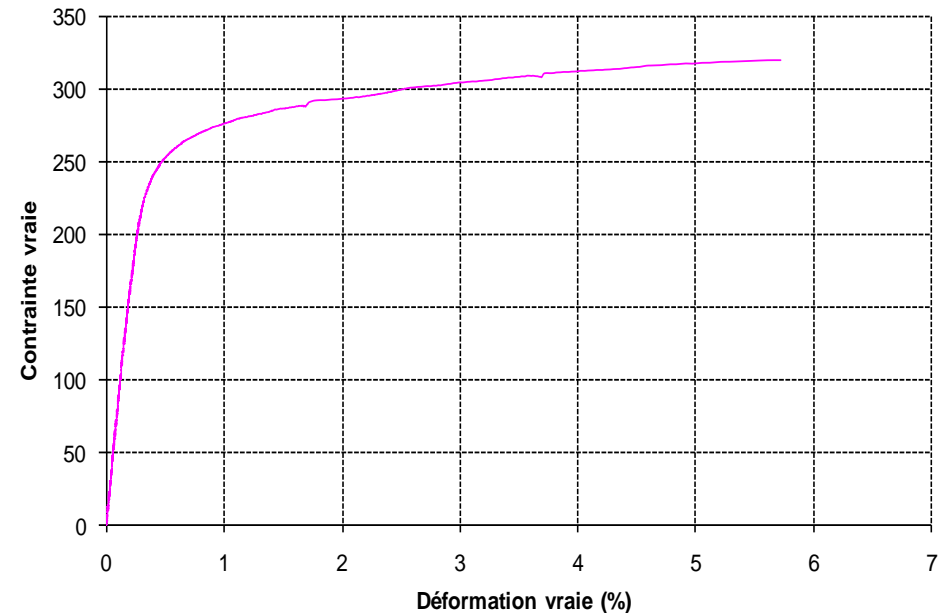
$\text{Rm}$  = 318 MPa

**A% = 3-5 %**



Présence de micro-retassures due au procédé de fonderie

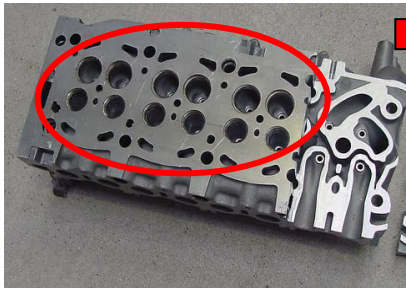
Surface des retassures ( $\sqrt{\mu\text{m}^2}$ ) = 48 à 245



Comportement peu ductile

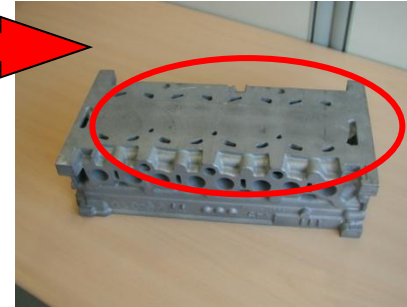
## 1. Modification des culasses pour extraction d'éprouvettes

Collaboration avec L. Augustins et fonderie de Charleville-Mézières



Avant

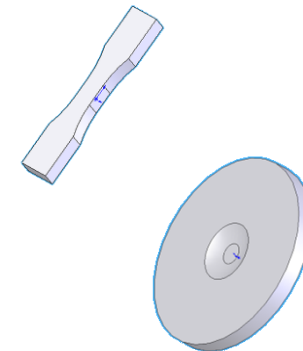
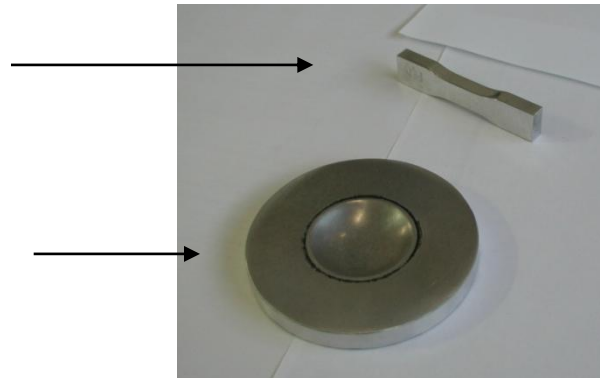
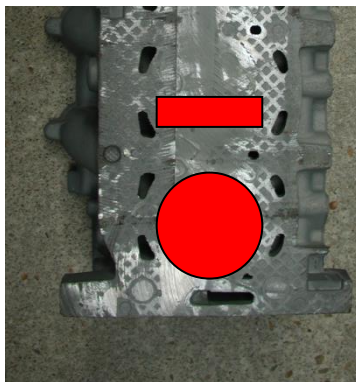
Modification  
taille noyaux



Après

Comparaison des propriétés mécaniques du matériau : DAS, dureté et taille des retassures

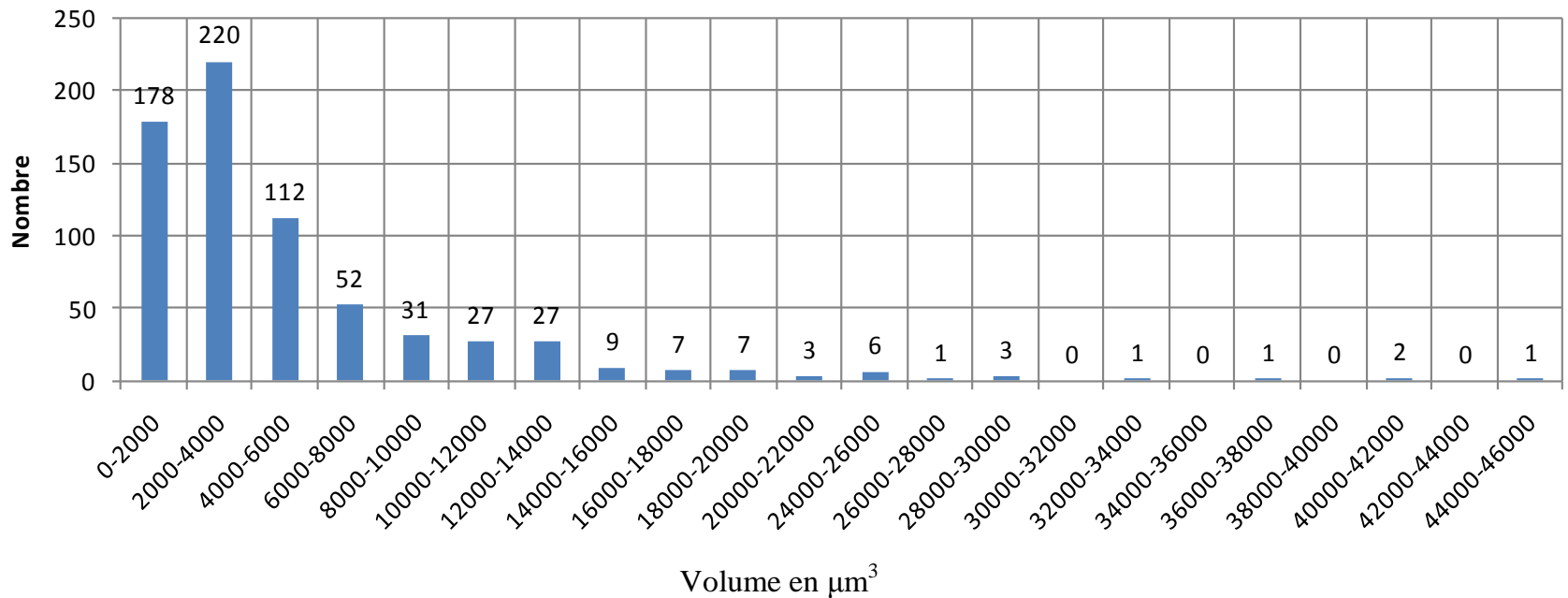
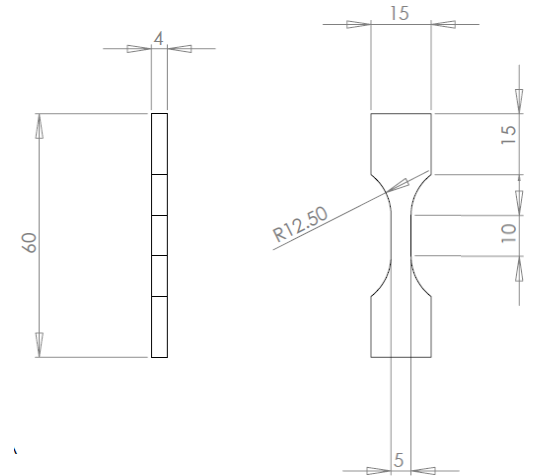
## 2. Extraction et Géométrie d'éprouvettes



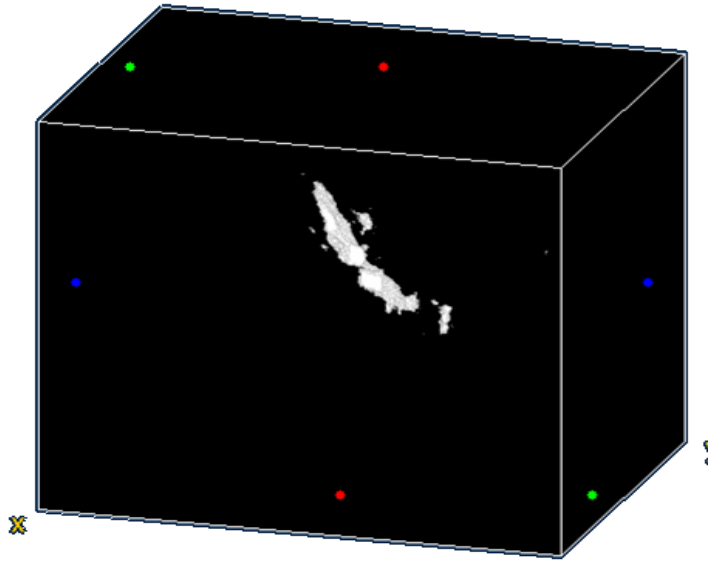
# Analyse par tomographie #1

Caractérisation du matériau  
Tomographe v/tome/X du laboratoire MATEIS  
de l'INSA Lyon (J. Adrien)

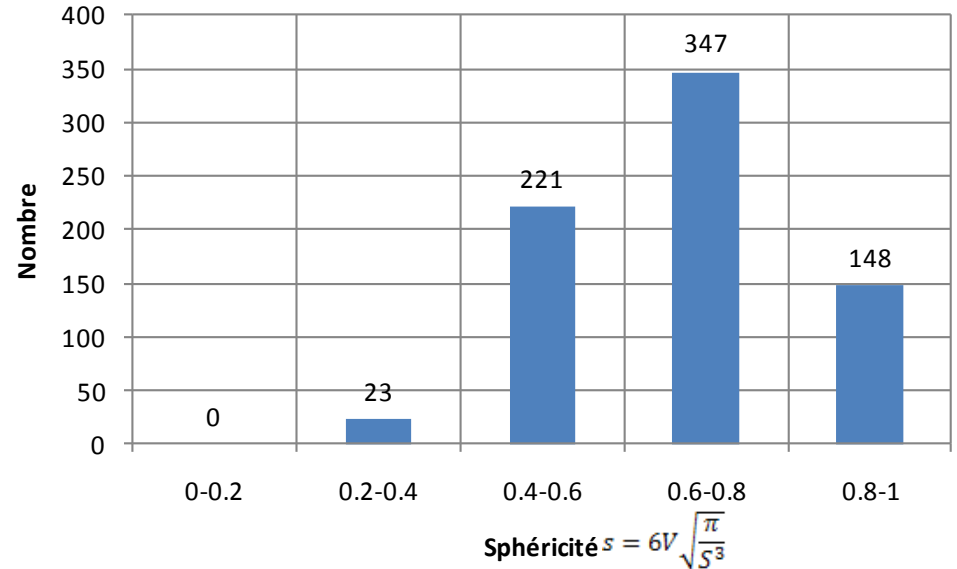
Volume scanné : 3,5 x 4 x 6,5 mm<sup>3</sup>



# Analyse par tomographie #2



Exemple de géométrie tortueuse  
(700 x 500 x 300  $\mu\text{m}$ )



Sphéricité :

- s tend vers 1 pores sphériques
- s tend vers 0 pores tortueux

Hypothèse de géométrie hémisphérique contestable [Buffière et al 2001]

# Synthèse des résultats expérimentaux en fatigue uniaxiale

Prélèvement dans les classes

• Sollicitation  
**Flexion plane et traction**

• Fréquence = 80 Hz (F.P) et 30 Hz (T.)

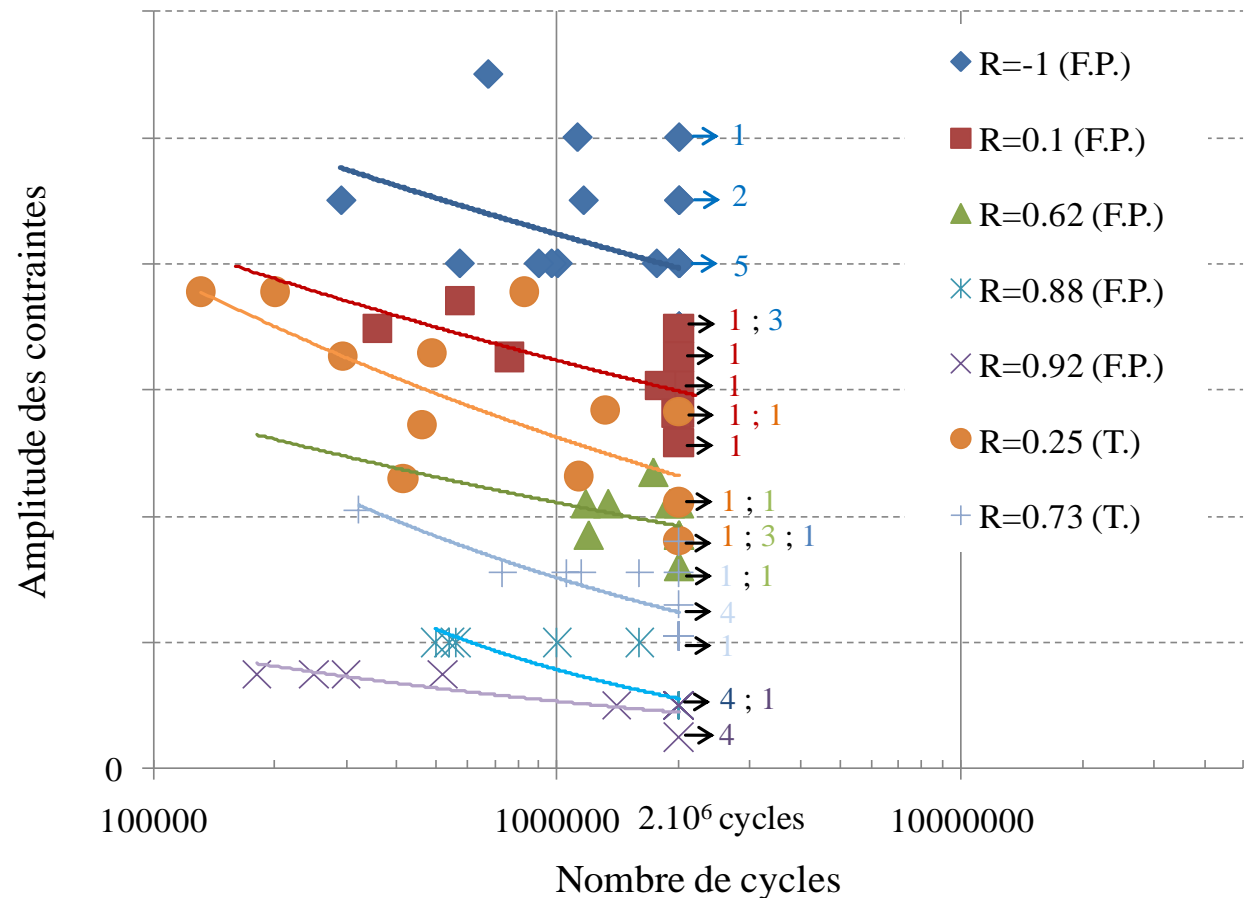
**10 éprouvettes par escalier**

Polissage jusqu'à 3  $\mu\text{m}$

• Critère d'arrêt

Chute de fréquence de 0.1 Hz

(taille de fissure  $\approx 1$  mm)

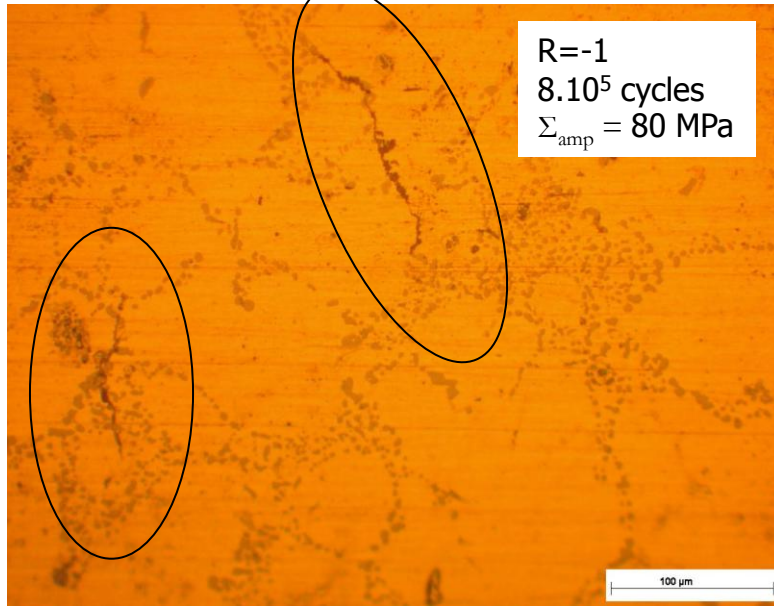


Aplatissement des courbes pour les forts rapports de charge [Karadag et al 2003]

# Mécanismes (chargement uniaxial AlSi7Cu05Mg03) #1

Apparition de deux mécanismes co-existants (sur une même éprouvette)

## Mécanisme 1



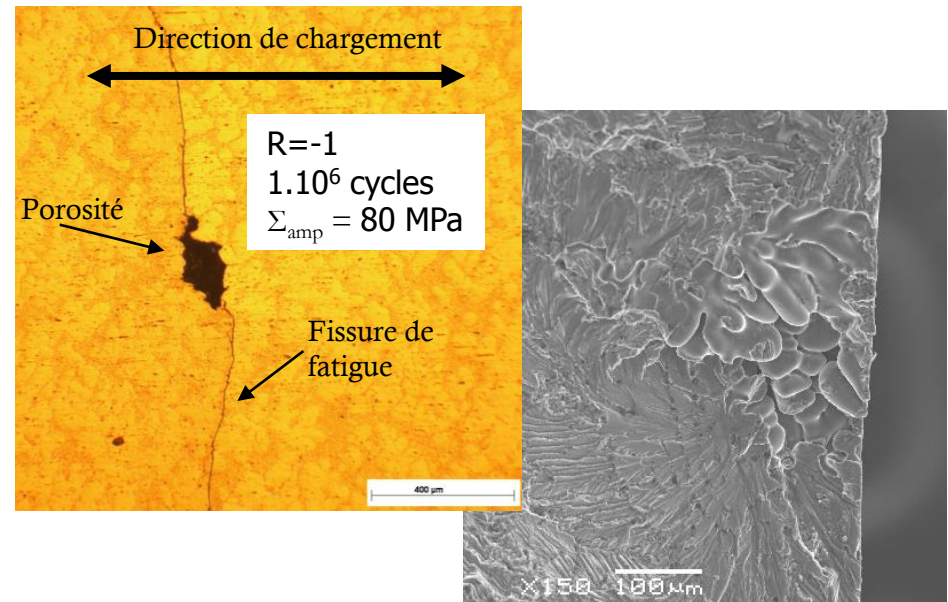
Amorçage des fissures de fatigue non associées aux défauts contrôlé par la matrice Al, les particules Si et les précipités)

[Gao et al 2004]

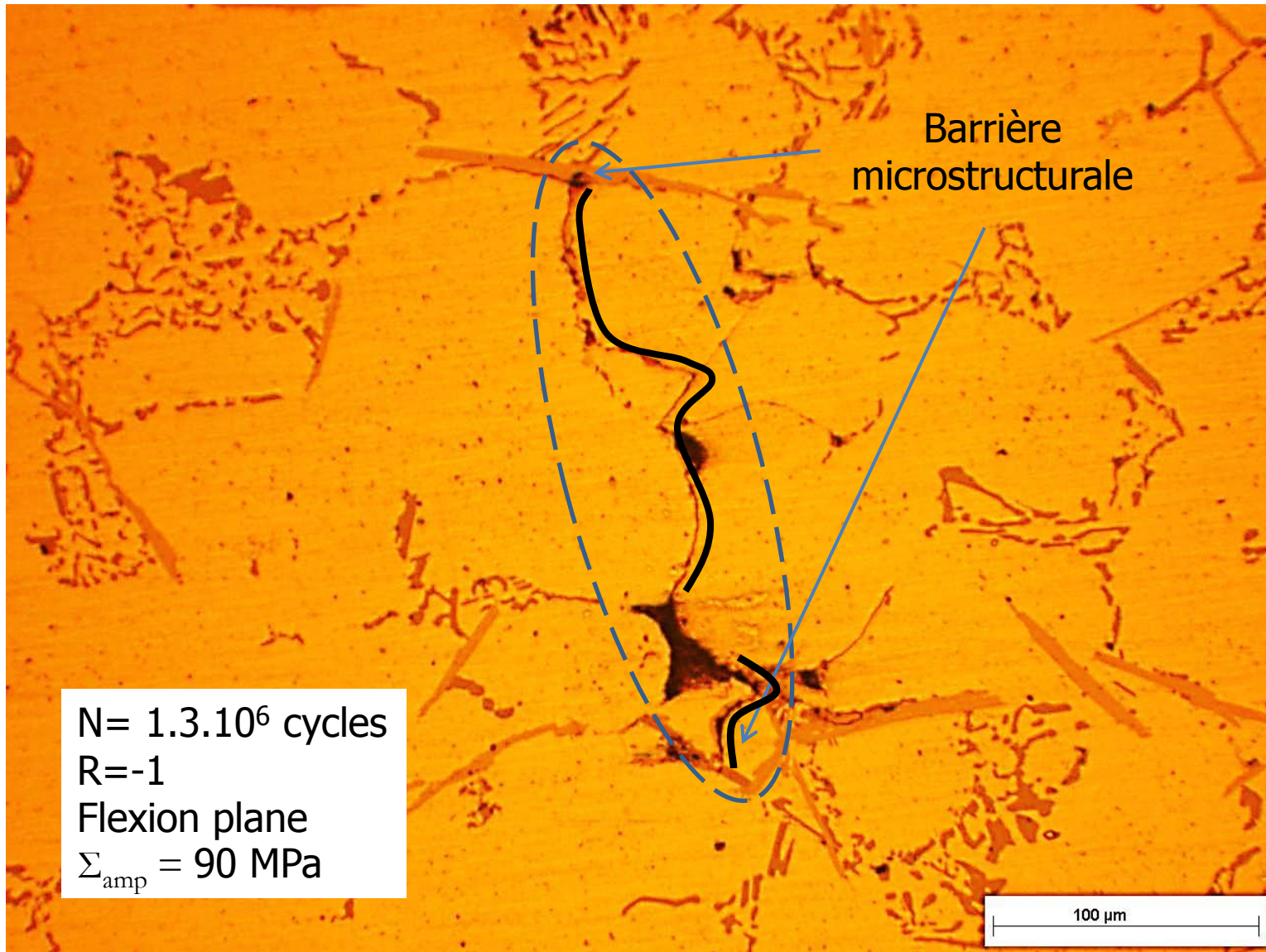
## Mécanisme 2

Amorçage des fissures de fatigue à partir des défauts (pores)

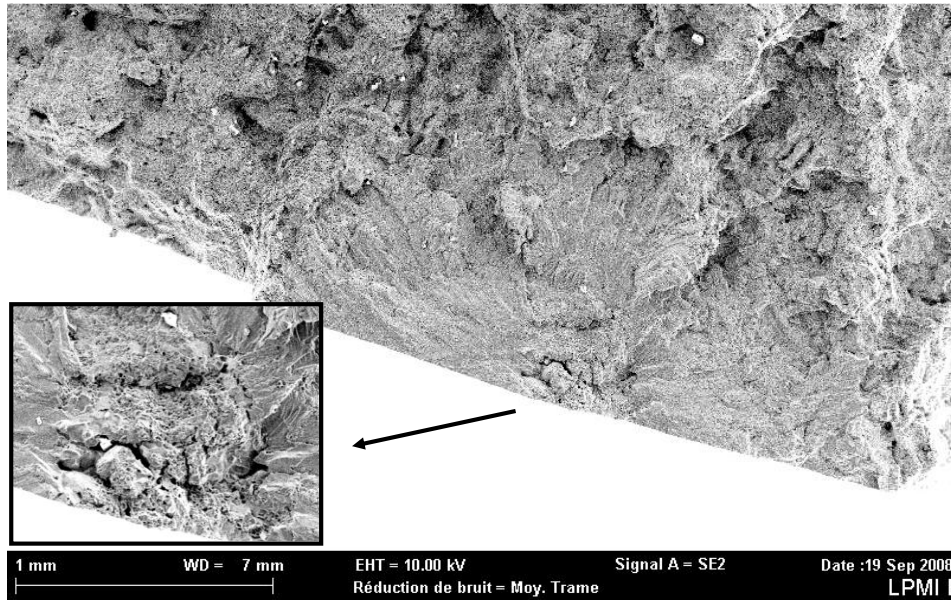
[Inguanti 1985, Sonsino et al 1991, Murali et al 1997, Powell 1994, Skallerud 1993,...].



# Mécanismes (chargement uniaxial AlSi7Cu05Mg03) #2



# Mécanismes sous fort rapport de charge



Cas d'un alliage  
d'aluminium de fonderie

Faciès de rupture sous  
fort rapport de charge

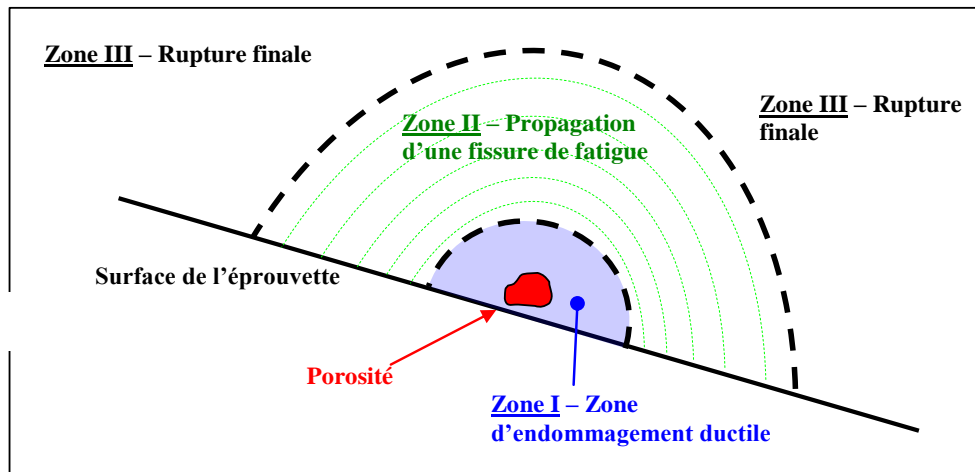
$R=0.9$

$N = 5,5 \cdot 10^5$  cycles

$\Sigma_{amp} = 15$  MPa

Traction uniaxial

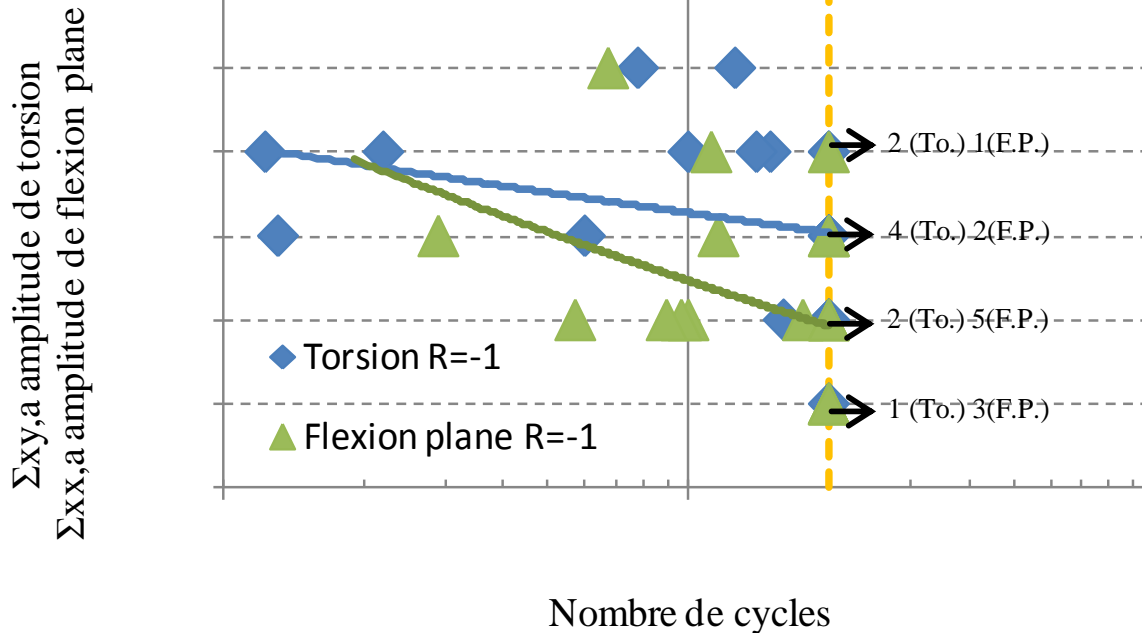
Mécanismes similaires  
sur un alliage  
d'aluminium corroyé  
2024-O.





# Comportement en torsion (AlSi7Cu05Mg03)

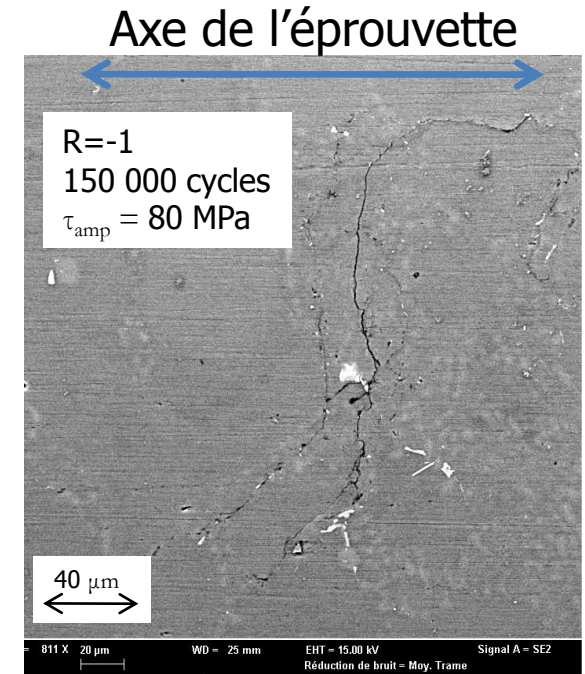
20 éprouvettes par escalier pour chaque mode de chargement



- limite de fatigue en torsion-flexion plane quasi similaire

Ex. de matériau à défaut FGS [Nadot et al 2004]

Traction uniaxiale = 225 MPa et Torsion = 217 MPa



Non-amorçage sur pores  
Propagation en mode II  
(Plan de cis. max)

Obs. similaires par [Pinna et al 2009] sur un acier maraging

# Plan

## I. Comportement et mécanismes d'amorçage en fatigue uniaxiale et biaxiale avec contrainte moyenne

- Chargement uniaxial : Flexion plane et torsion
- **Chargement multiaxial : Traction équilibiaxiale**
- Analyse des effets de moyenne et de biaxialité

---

## II. Modélisation probabiliste de l'effet des hétérogénéités microstructurales (cas de l'AlSi7Cu05Mg03)

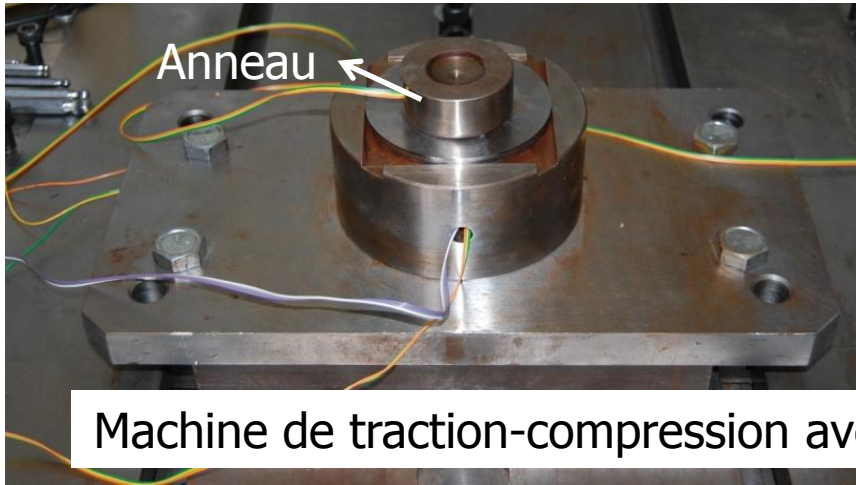
- Mécanisme 1 : Mésoplasticité
- Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture

---

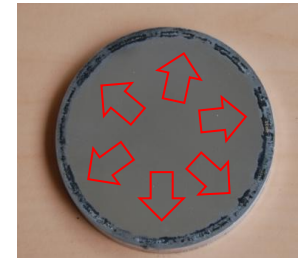
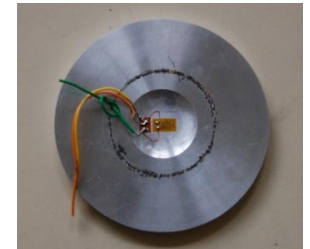
## III. Effet du couplage Plasticité/Endommagement à fortes valeurs moyennes

- Modèle de Monchiet
- Modélisation proposée

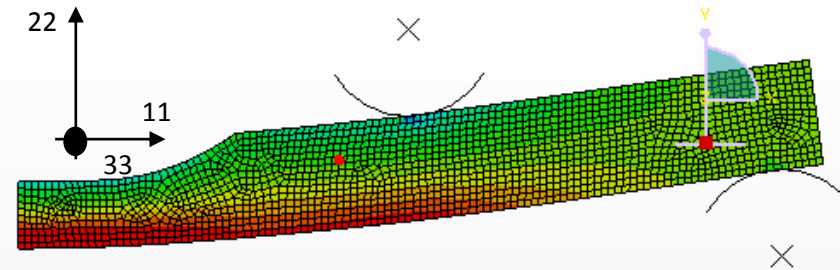
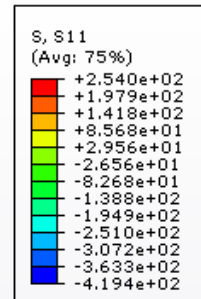
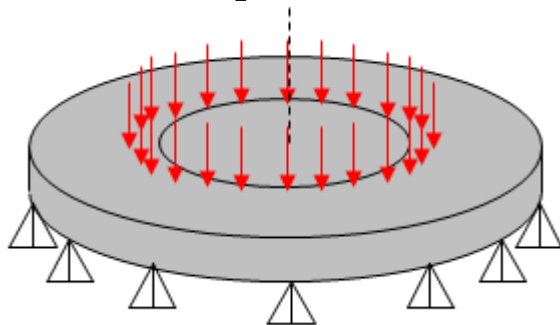
# Mise en place d'un dispositif expérimental de flexion axisymétrique



Machine de traction-compression avec montage dédié



$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11}(t) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_{22}(t) = \Sigma_{11}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



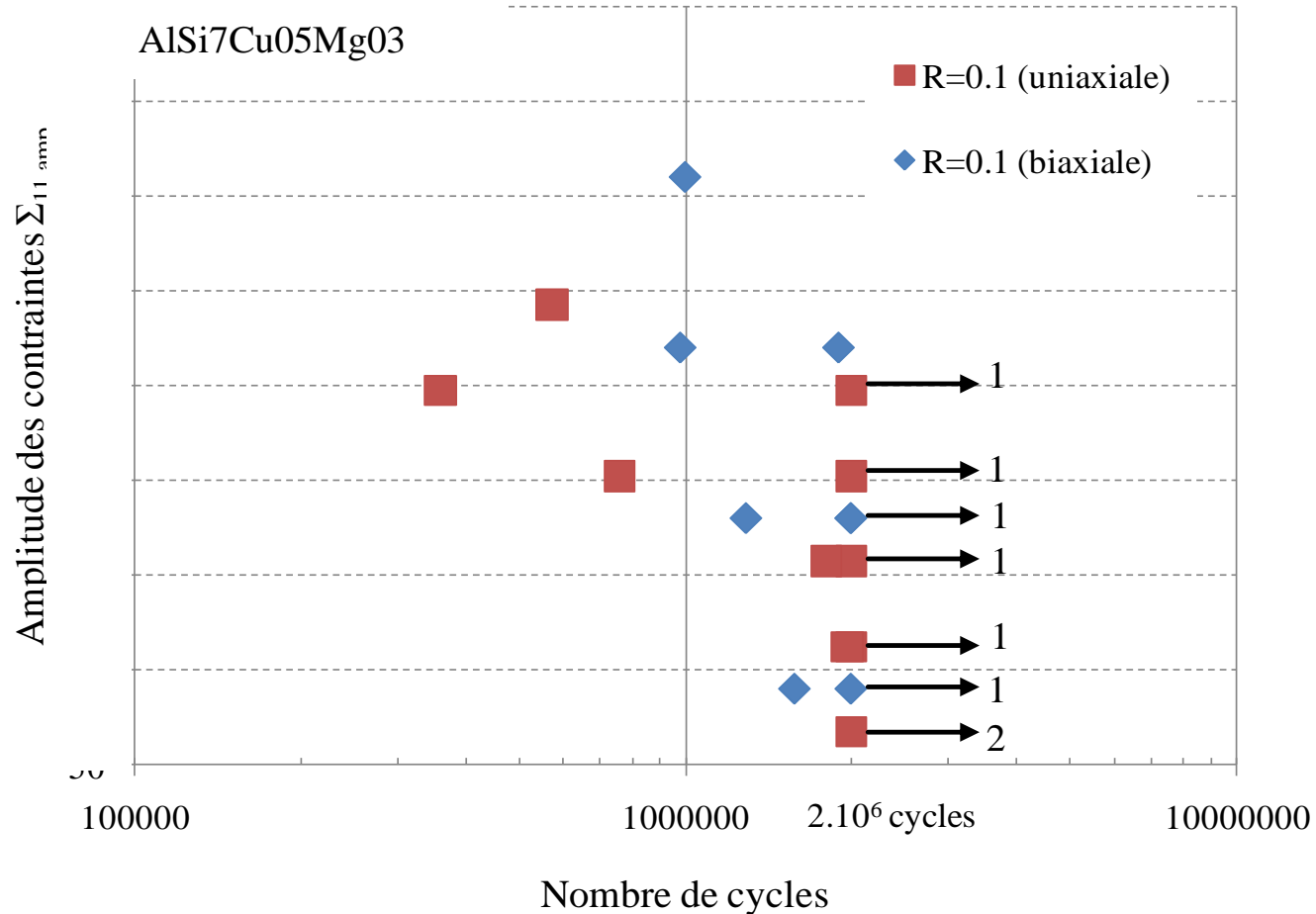
Simulation numérique Abaqus  
Obtention du champ de contraintes

# Synthèse des résultats expérimentaux en fatigue équilibrée

- Critère d'arrêt :  $\Delta\varepsilon = 100 \mu\epsilon$  (jauge sur toutes les éprouvettes)

- **Limite de fatigue similaire entre le chargement de flexion plane et de traction équilibrée**

**R=0.1**

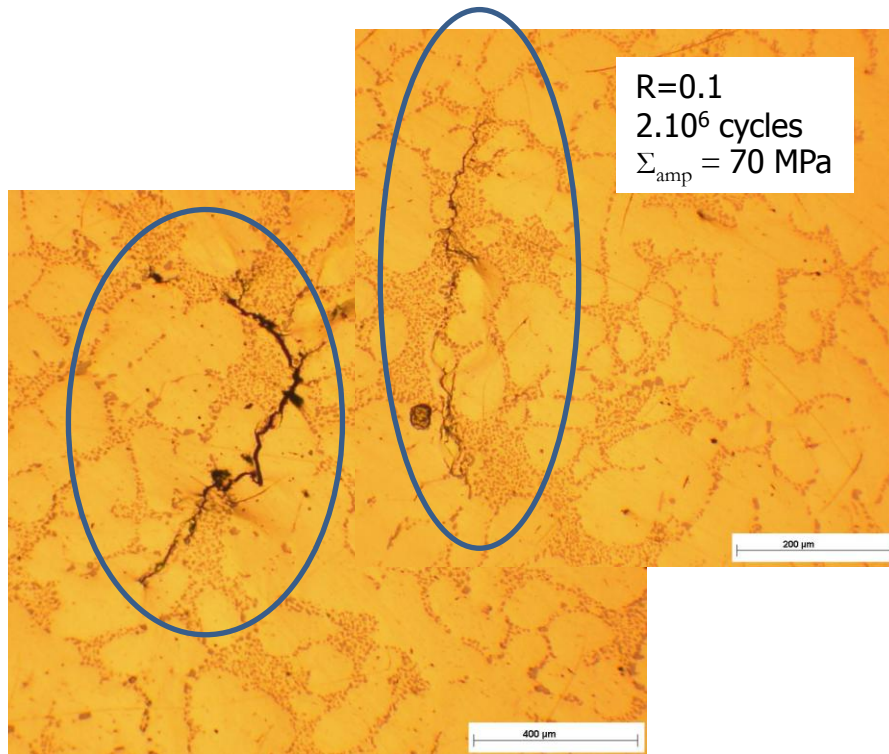


Courbe de Wöhler (Rapport de charge fixé R=0.1)

# Mécanismes (traction équibiaxiale)

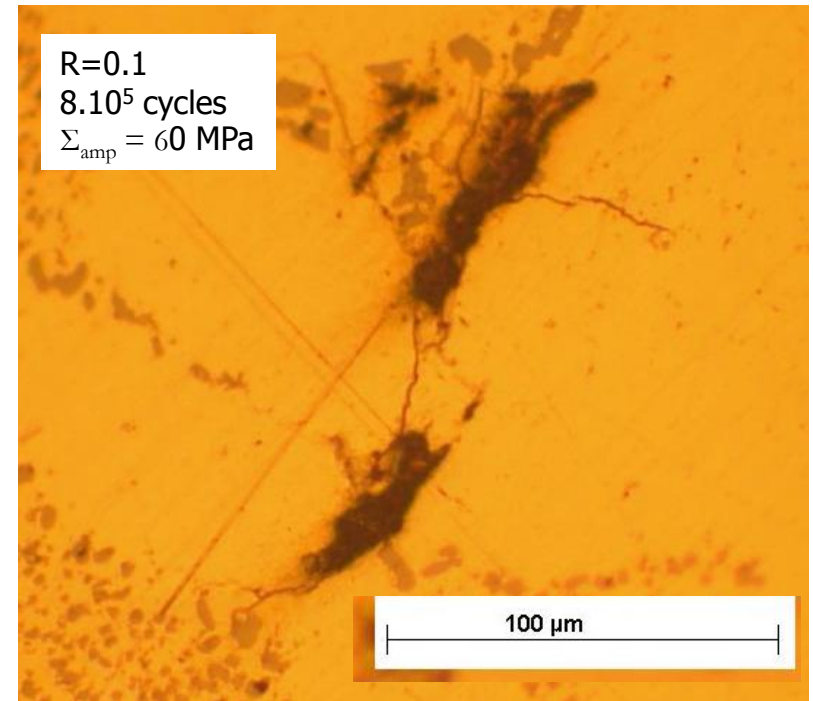
Deux mécanismes similaires au chargement uniaxial

## Mécanisme 1



Amorçage des fissures de fatigue contrôlé par la matrice Al, les particules Si et les intermétalliques, dans la zone eutectique

## Mécanisme 2



Propagation des fissures de fatigue à partir des défauts (pores)  
Plus de direction privilégiée

# Plan

## I. Comportement et mécanismes d'amorçage en fatigue uniaxiale et biaxiale avec contrainte moyenne

- Chargement uniaxial : Flexion plane et torsion
- Chargement multiaxial : Traction équibiaxiale
- **Analyse des effets de moyenne et de biaxialité**

## II. Modélisation probabiliste de l'effet des hétérogénéités microstructurales (cas de l'AlSi7Cu05Mg03)

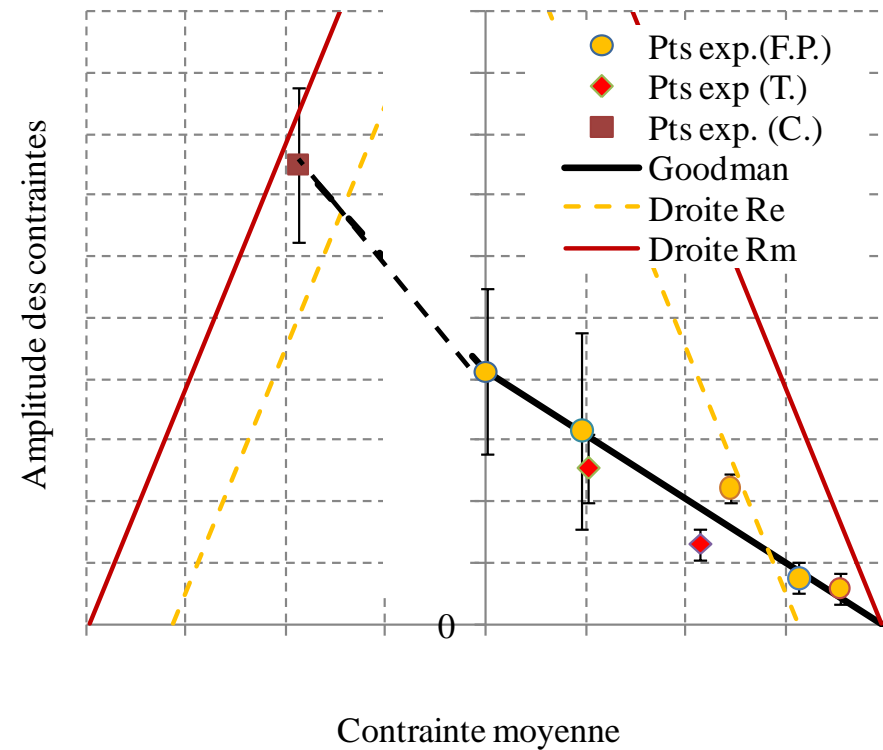
- Mécanisme 1 : Mésoplasticité
- Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture

## III. Effet du couplage Plasticité/Endommagement à fortes valeurs moyennes

- Modèle de Monchiet
- Modélisation proposée

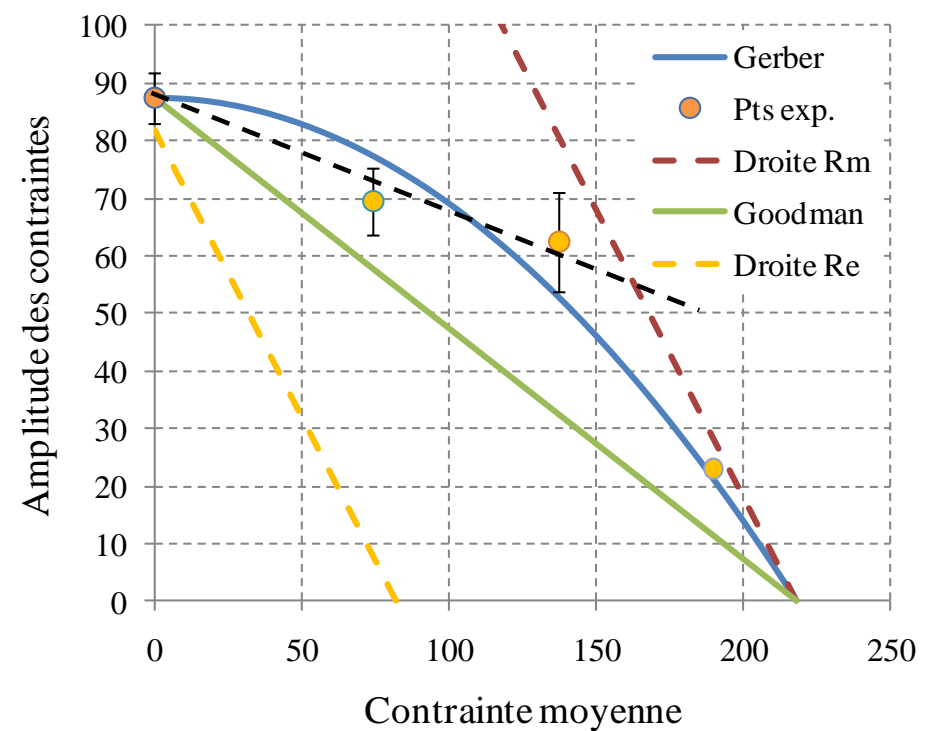
# Synthèse des effets de moyenne (Chargement uniaxial)

AlSi7Cu05Mg03



- Tendance linéaire
- Diminution de la dispersion
- Critère de Goodman
- Présence d'un effet unilatéral

2024-O

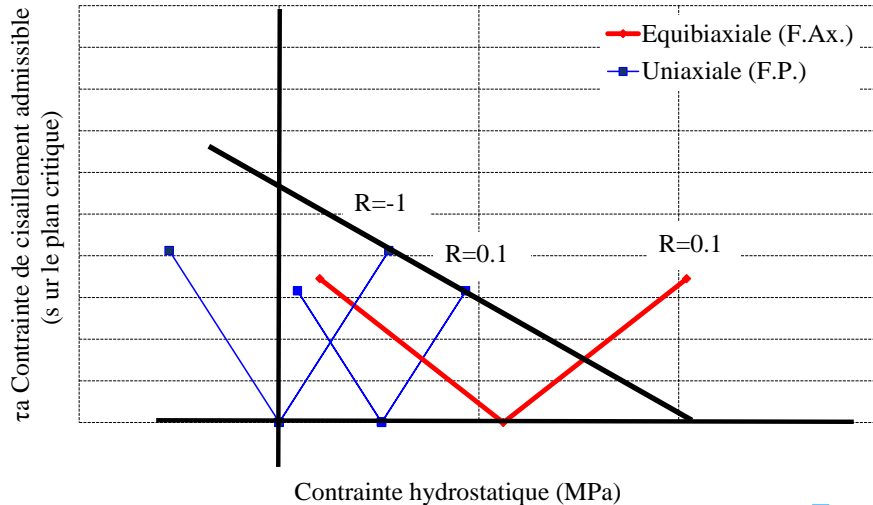


- Comportement différent de l'AlSi7Cu05Mg03
- Tendance linéaire ( $\neq$  de Goodman et Gerber)
- Comportement similaire pour de nombreux aciers
- Contrôlé par la limite à rupture pour les forts rapports de charge

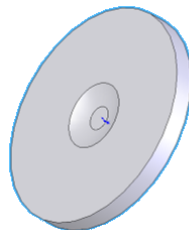
# Synthèse des effets de la biaxialité

## - Diagramme de Dang Van

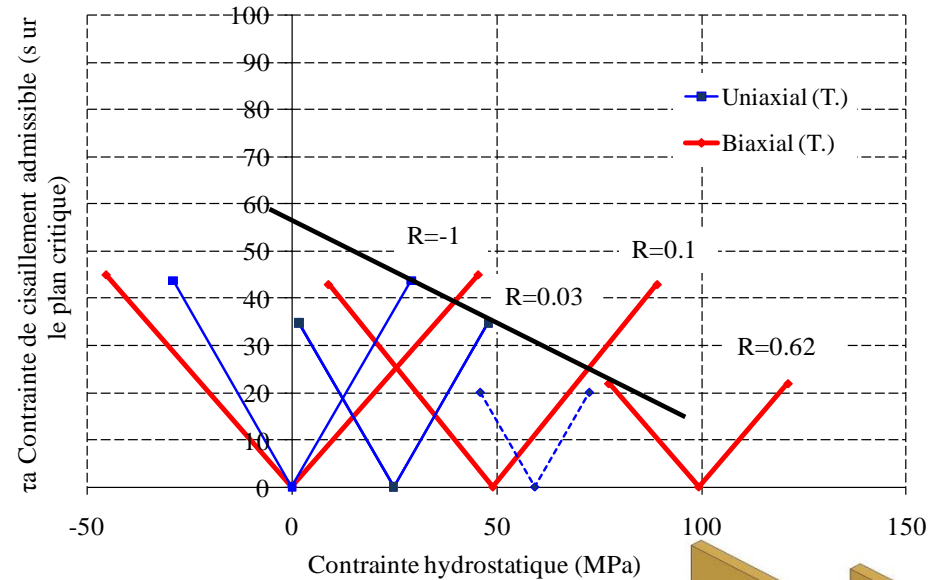
AlSi7Cu05Mg03



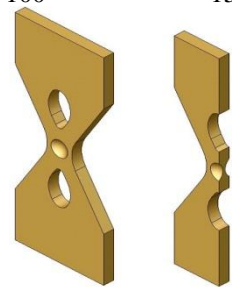
Utilisation de l'éprouvette disque



2024-O



Utilisation de l'éprouvette en X  
(Degré de biaxialité de 0.4)



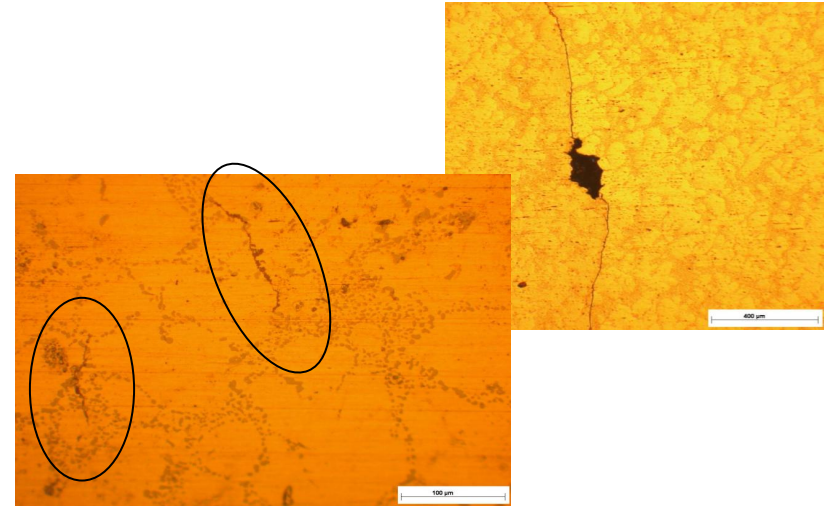
- Pas d'effet néfaste de la biaxialité [Poncelet et al 2009]
- Critère de Dang Van conservatif



## Conclusion partielle

- ✓ Caractérisation du comportement de l'alliage d'aluminium de fonderie en fatigue uniaxiale et biaxiale.

- ✓ Apparition de **deux types de mécanismes** d'amorçage suivant le type d'hétérogénéités microstructurales dans l'alliage d'aluminium de fonderie.



- ✓ Limite de fatigue en torsion proche de la limite de fatigue en flexion plane (Alliage d'aluminium de fonderie)

- ✓ **Pas d'effet néfaste de la biaxialité** (Alliage d'aluminium de fonderie et autres matériaux)

# Plan

## I. Comportement et mécanismes d'amorçage en fatigue uniaxiale et biaxiale avec contrainte moyenne

- Chargement uniaxial : Flexion plane et torsion
- Chargement multiaxial : Traction équibiaxiale
- Analyse des effets de moyenne et de biaxialité

## II. Modélisation probabiliste de l'effet des hétérogénéités microstructurales (cas de l'AlSi7Cu05Mg03)

- Mécanisme 1 : Mésoplasticité
- Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture

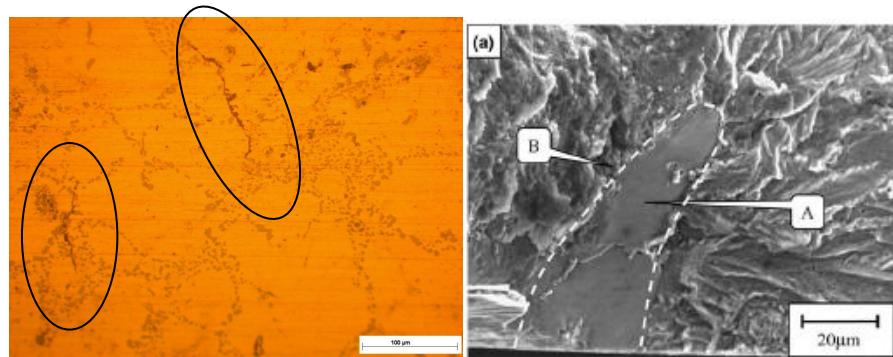
## III. Effet du couplage Plasticité/Endommagement à fortes valeurs moyennes

- Modèle de Monchiet
- Modélisation proposée

# Alliage d'aluminium de fonderie

Mécanismes d'amorçage de fissures rencontrés dans le matériau

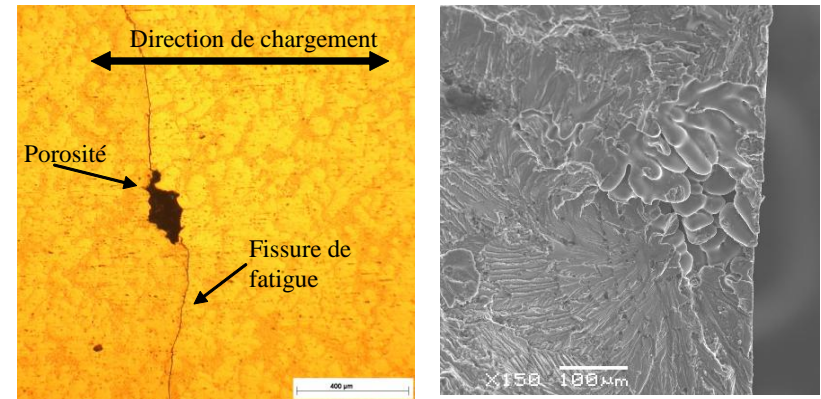
## Mécanisme 1



[Gao et al 2004]

Amorçage des fissures de fatigue non associés aux pores (mais contrôlé par la matrice Al, les particules Si et les précipités)

## Mécanisme 2



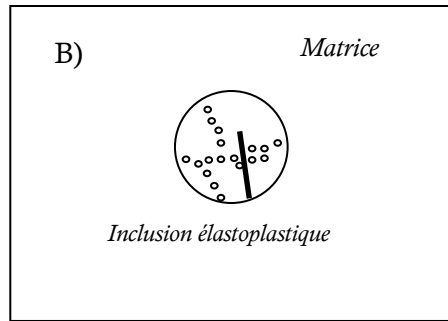
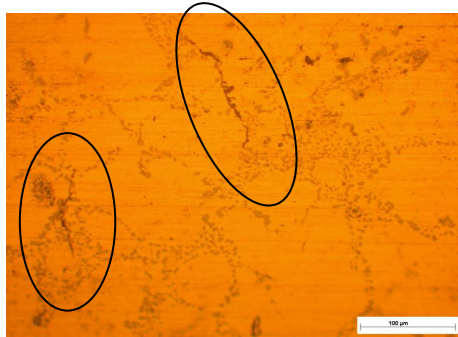
Amorçage des fissures de fatigue à partir des défauts (pores)

[Inguanti 1985, Sonsino et al 1991, Murali et al 1997, Powell 1994, Skallerud 1993,...].

Mécanismes différents selon hétérogénéités microstructurales

# Critère de fatigue probabiliste

## Mécanisme 1 : Mésoplasticité



$$f_{01} = \frac{m_1}{\Gamma_{01}} \left( \frac{\Gamma_c}{\Gamma_{01}} \right)^{m_1-1} \exp \left[ - \left( \frac{\Gamma_c}{\Gamma_{01}} \right)^{m_1} \right]$$

Distribution de Weibull [Flacelière 2004, Doudard 2004]

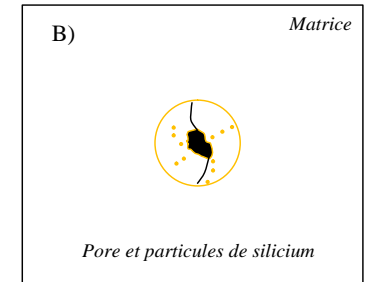
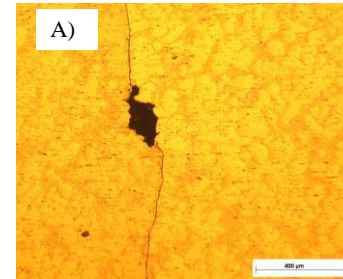
$$\Gamma_\infty = \frac{(T_a - T_y^{(0)})}{g} < \Gamma_c$$

Déformation plastique mésoscopique accumulée [Papadopoulos 1993]

$$P_{F1} = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{V_{01}} \int_V \left\{ \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \left( \frac{\Gamma_\infty(\theta, \phi, \psi)}{\Gamma_{01}} \right)^{m_1} \sin\theta d\theta d\psi d\varphi \right\} dV \right]$$

Hyp. du maillon le plus faible

## Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture



$$f_{02}(\Delta K_{th}) = \frac{m_2}{\Delta K_{th02}} \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{th02}} \right)^{m_2-1} \exp \left[ - \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{th02}} \right)^{m_2} \right]$$

Distribution de Weibull [Agha 1996]

$$\Delta K(\theta, \varphi) = \Delta \sigma(\theta, \varphi) \beta \sqrt{\pi a} g(R)$$

Facteur d'intensité de contraintes mode I

$$P_{F2} = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{V_{02}} \int_V \left\{ \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \left( \frac{\Delta K(\theta, \varphi)}{\Delta K_{th02}} \right)^{m_2} \sin\theta d\theta d\varphi \right\} dV \right]$$

Hyp. du maillon le plus faible

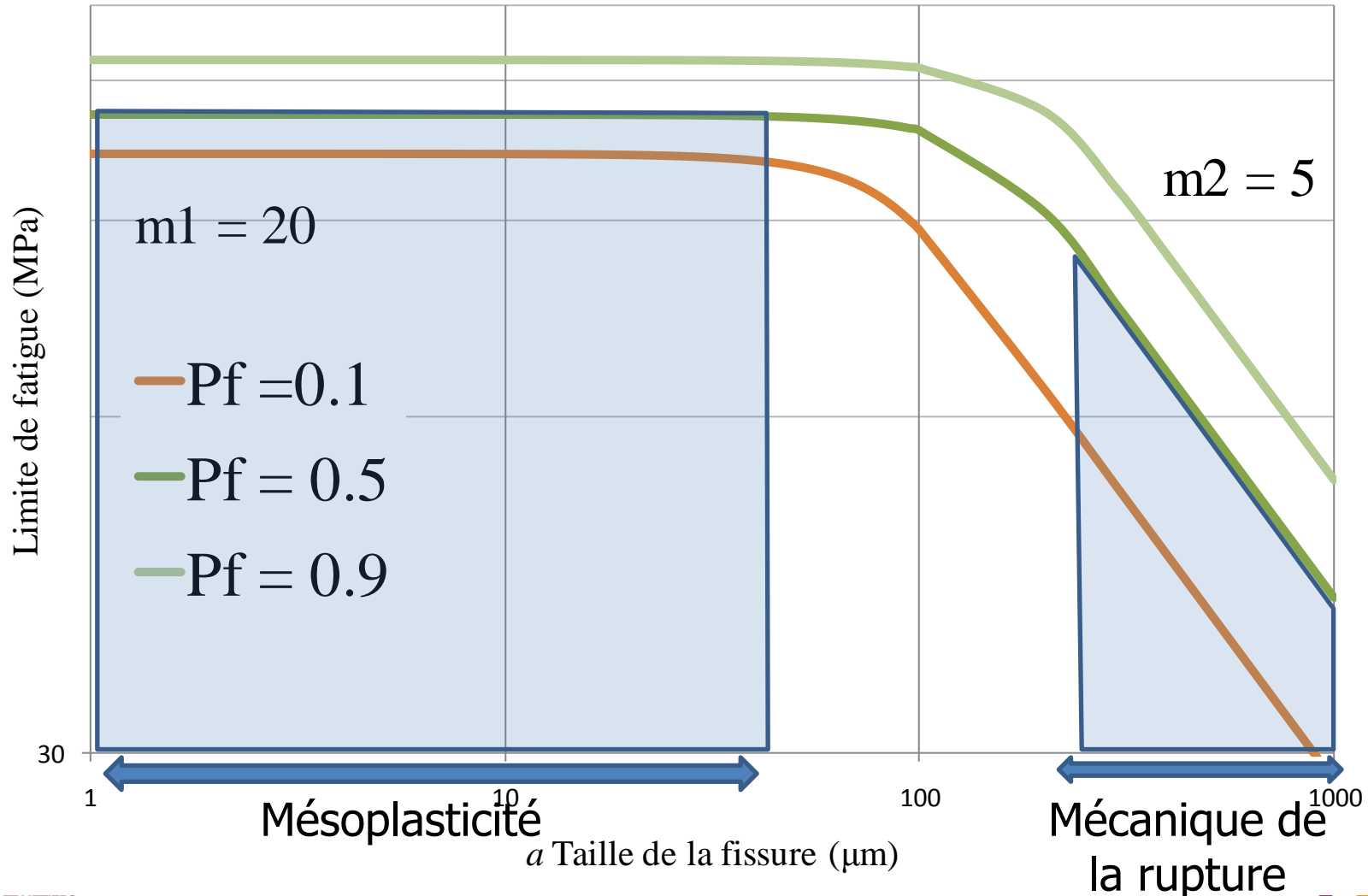
$$1 - P_f = (1 - P_{f1}) (1 - P_{f2})$$

Distribution de Weibull + hypothèse du maillon le plus faible

[Pessard 2009]

# Prédictions du modèle probabiliste – AlSi7Cu05Mg03

Diagramme de Kitagawa –Takahashi    Rapport de charge  $R=-1$  (Traction uniaxiale)  
Paramètres :  $\Delta K_{th} = 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  et  $\beta = 0.65$  (fissure semi-circulaire)



# Plan

## I. Comportement et mécanismes d'amorçage en fatigue uniaxiale et biaxiale avec contrainte moyenne

- Chargement uniaxial : Flexion plane et torsion
- Chargement multiaxial : Traction équibiaxiale
- Analyse des effets de moyenne et de biaxialité

---

## II. **Modélisation probabiliste de l'effet des hétérogénéités microstructurales (cas de l'AlSi7Cu05Mg03)**

- **Mécanisme 1 : Mésoplasticité**
- Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture

---

## III. Effet du couplage Plasticité/Endommagement à fortes valeurs moyennes

- Modèle de Monchiet
- Modélisation proposée

# Mécanisme 1 : Mésoplasticité - Cas de matériaux sans défauts

## Modèle de [Huyen-Morel 2008]

- Basé sur l'adaptation élastique
- Utilisation de la contrainte normale

3 paramètres du modèle à identifier :

- $\alpha$  Coefficient effet de biaxialité
- $\gamma$  Coefficient effet de la contrainte moyenne
- $m_1$  Paramètre de Weibull (effet de dispersion)

$$P_{F1} = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{V_{01}} \int_V \frac{X_a^{m_1}}{T_{01}^{m_1}} \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \left( \frac{\chi_a(\theta, \phi, \psi)}{(1 - \gamma \Sigma_{n,m}(\theta, \phi)) X_a} \right)^{m_1} \sin\theta d\theta d\phi d\psi dV \right]$$

$$\chi_a(\theta, \phi, \psi) = T_a(\theta, \phi, \psi) + \alpha \Sigma_{n,a}(\theta, \phi) \quad X_a = \max_{\theta, \phi, \psi} \{ \chi_a(\theta, \phi, \psi) \}$$

Capacités de prédictions du critère à caractériser le comportement en fatigue du matériau sous effet de moyenne et de la biaxialité (traction biaxiale) ?

# Synthèse des critères de fatigue

## Contrainte hydrostatique

Critère de Dang Van

$$\max_{\vec{n}} \left\{ \max_t [\|\vec{\tau}_a(\vec{n}, t)\| + \alpha \Sigma_h(t)] \right\} \leq \beta$$

Critère de Papadopoulos

$$\sqrt{\langle [\tau_a(\theta, \phi, \psi)]^2 \rangle} + \alpha \Sigma_{h,max} < \beta$$

Critère de Huyen (Hyd.)

## Contrainte normale

Critère de Huyen (Norm.)

$$P_{F1} = 1 - \exp \left[ -\frac{1}{V_{01}} \int_V \frac{X_a^{m_1}}{T_{01}^{m_1}} \left\{ \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \left( \frac{\chi_a(\theta, \phi, \psi)}{(1 - \gamma \Sigma_{n,m}(\theta, \phi)) X_a} \right)^m \sin\theta d\theta d\phi d\psi \right\} dV \right]$$

$$\chi_a(\theta, \phi, \psi) = T_a(\theta, \phi, \psi) + \alpha \Sigma_{n,a}(\theta, \phi)$$

Critère de Liu et Zenner

*Coef. non dédié aux effets de moyenne*

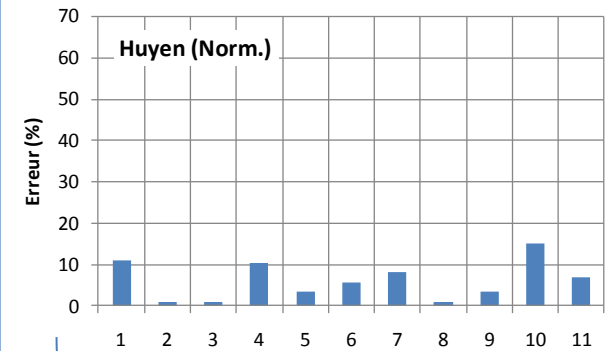
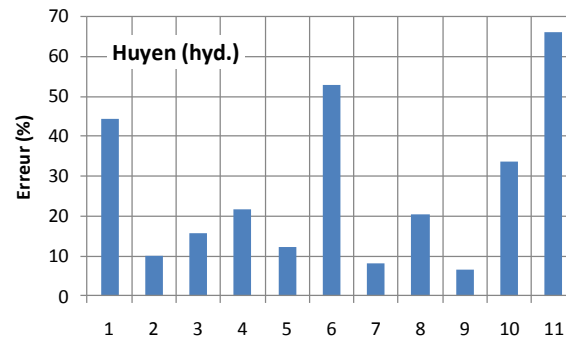
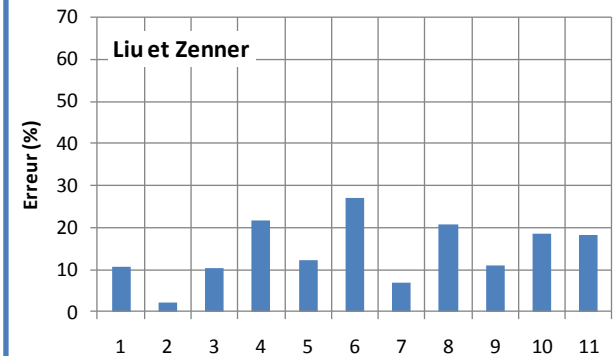
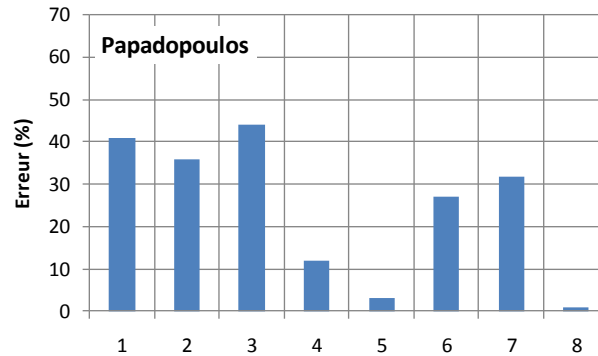
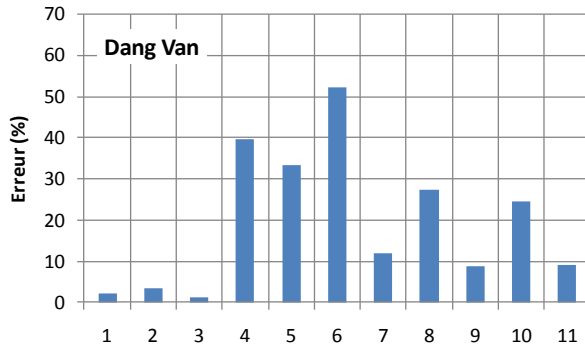
*Coef. dédié aux effets de moyenne*

*Matériaux de la littérature :*

- XC 48 [Simburger 1975]
- St35 [Issler 1973]
- 25CrMo4 [Mielke et al 1980]
- 34Cr4 [Hendenreich 1983]
- ER7
- 2024-O



# Erreurs de prédictions des critères – chargement de traction biaxiale



Contrainte hydrostatique

Contrainte normale

$$erreur (\%) = \left( \frac{|\Sigma_{11,amp}^{prédite} - \Sigma_{11,amp}^{expérimental}|}{\Sigma_{11,amp}^{expérimental}} \right) * 100$$

1	34Cr4
2	St 35 ( $\Sigma_{11,moy} = 153$ MPa)
3	St 35 ( $\Sigma_{11,moy} = 169$ MPa)
4	XC 48 ( $\Sigma_{11,moy} = 339$ MPa)
5	XC 48 ( $\Sigma_{11,moy} = 367$ MPa)

6	ER7
7	25CrMo4 (k =0.5)
8	25CrMo4 (k=1)
9	2024-0 ( $\Sigma_{11,moy} = 0$ MPa)
10	2024-0 ( $\Sigma_{11,moy} = 105$ MPa)
11	2024-0 ( $\Sigma_{11,moy} = 200$ MPa)

# Synthèse des critères de fatigue

## Contrainte hydrostatique

Critère de Dang Van

Critère de Papadopoulos

Critère de Huyen (Hyd.)

## Contrainte normale

Critère de Huyen (Norm.)

Critère de Liu et Zenner

*Coef. non dédié aux effets de moyenne*

*Coef. dédié aux effets de moyenne*



Adapté aux effets de moyenne et de biaxialité (traction biaxiale)

# Plan

## I. Comportement et mécanismes d'amorçage en fatigue uniaxiale et biaxiale avec contrainte moyenne

- Chargement uniaxial : Flexion plane et torsion
- Chargement multiaxial : Traction équibiaxiale
- Analyse des effets de moyenne et de biaxialité

---

## II. **Modélisation probabiliste de l'effet des hétérogénéités microstructurales (cas de l'AlSi7Cu05Mg03)**

- Mécanisme 1 : Mésoplasticité
- **Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture**

---

## III. Effet du couplage Plasticité/Endommagement à fortes valeurs moyennes

- Modèle de Monchiet
- Modélisation proposée

# Mécanisme 2 : Mécanique de la rupture - Défauts

## Modèle de [Pessard 2009]

$$P_{F2} = 1 - \exp \left[ - \frac{1}{V_{02}} \int_V \frac{\Sigma_{n,a}^{m_2}}{\Sigma_{02}(R)^{m_2}} \left\{ \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \left( \frac{\sigma_{n,a}(\theta, \varphi)}{\Sigma_{n,a}} \right)^{m_2} \sin\theta d\theta d\varphi \right\} dV \right]$$

### 3 paramètres du modèle :

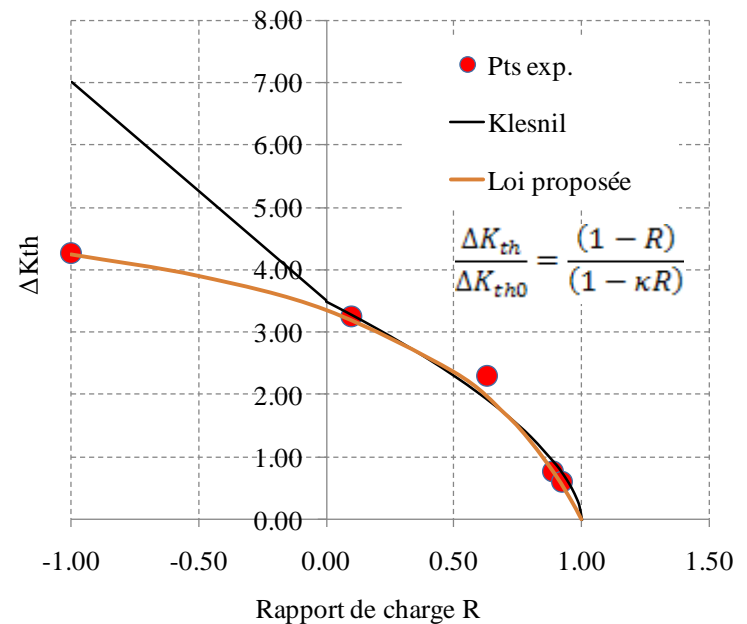
- m Paramètre de Weibull (effet de dispersion)

- Basé sur la mécanique de la rupture  
- Utilisation de la contrainte normale

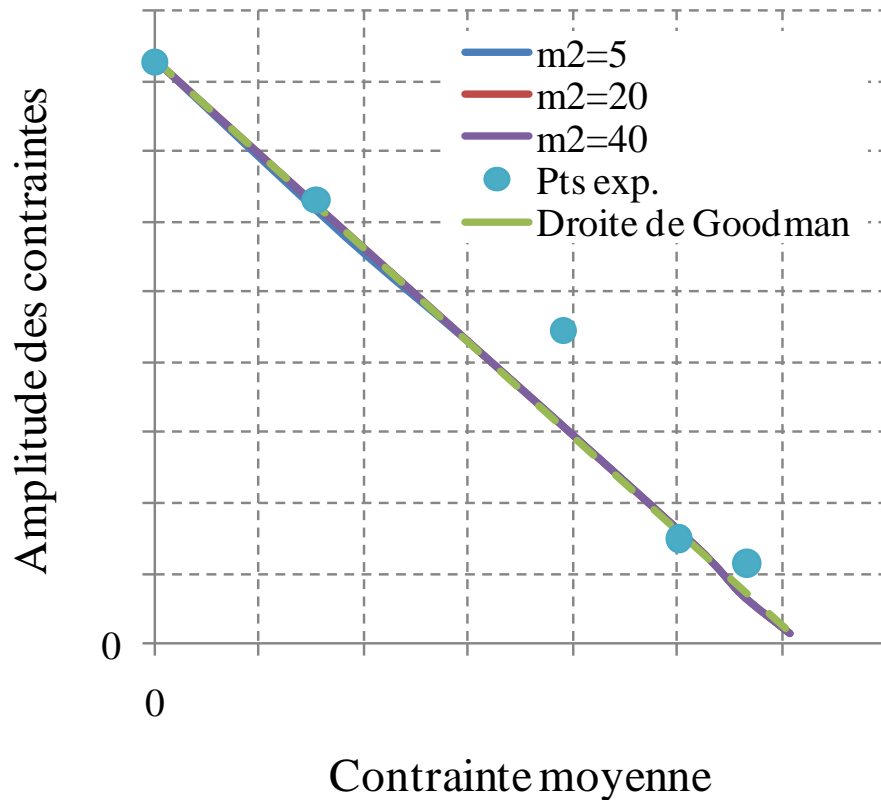
Intégration de l'effet du rapport de charge [Klesnil 1972, Kujawski 2001]

-  $\kappa$  Coefficient effet du rapport de charge

$$\Sigma_{02}(R) = \frac{\Sigma_d(R=0) \frac{(1-R)}{(1-\kappa R)}}{\Gamma \left( 1 + \frac{1}{m_2} \right) J_{m_2}^{-1/m_2}}$$



# Prédictions (mécanisme 2) - Effet de moyenne

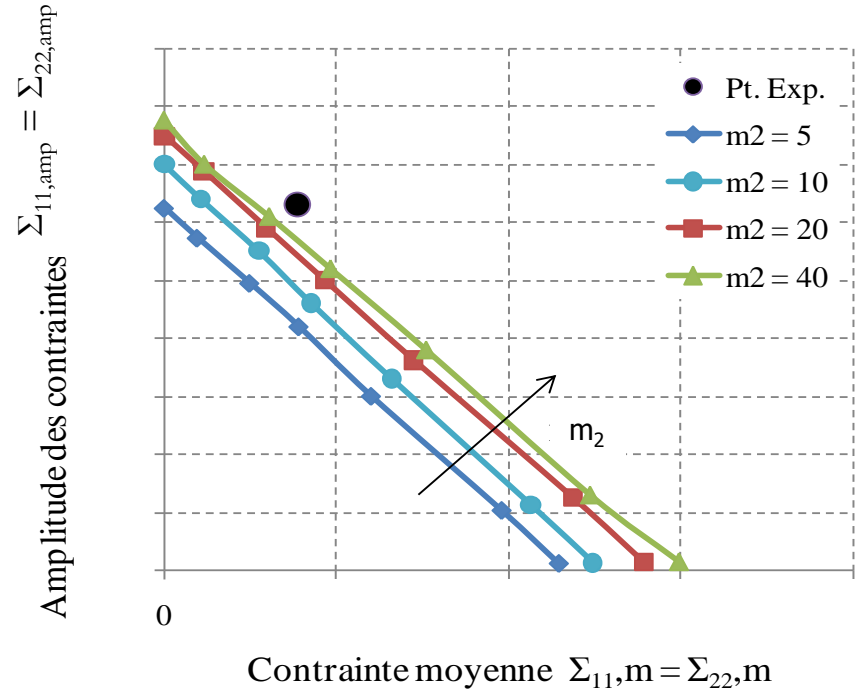
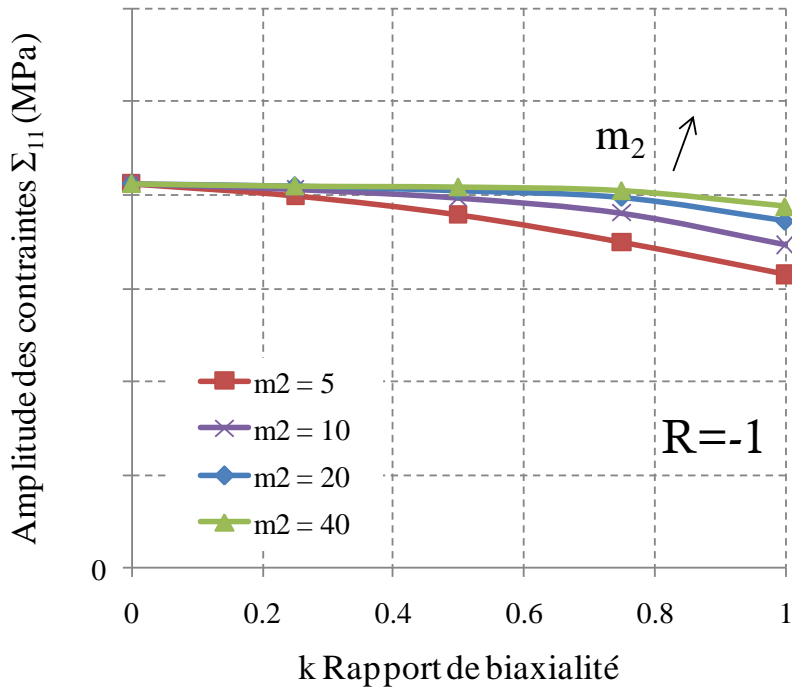


- Bonnes prédictions du critère dans le cas d'effet de la moyenne

- Peu d'influence du paramètre de Weibull  $m_2$ .

-  $m_2$  égal à 5 (identifié sur un escalier à l'aide de 20 éprouvettes)

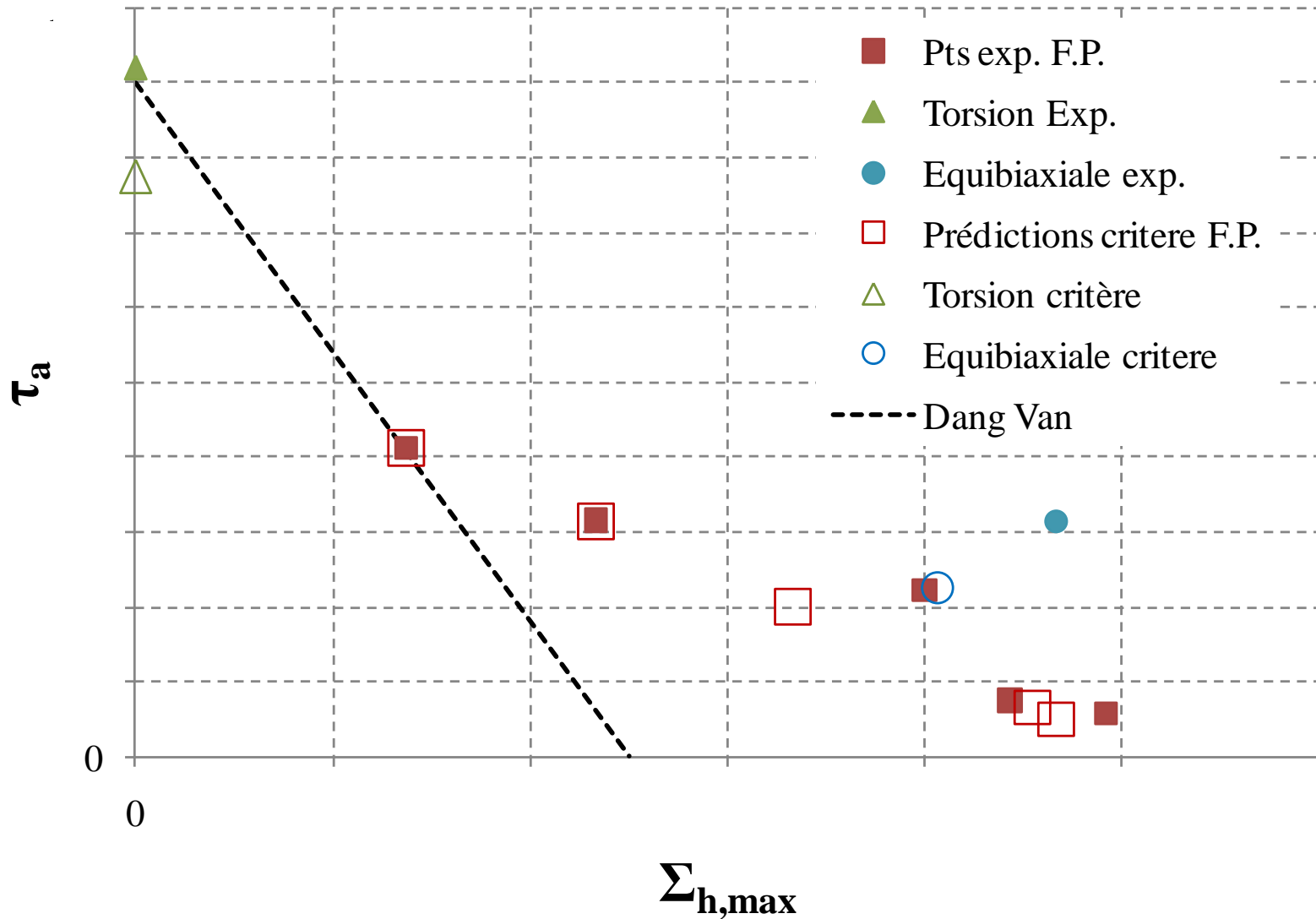
# Prédictions (mécanisme 2) - en traction équibiaxiale



Effet du paramètre de Weibull  $m_2$  :

- Influence du paramètre de Weibull  $m_2$
- Ecart de prédiction (variation du paramètre  $m_2$  avec l'effet de la moyenne)

# Synthèse Prédiction/Expérimental



## Conclusion

- Caractérisation du **comportement en FGNC d'un alliage d'aluminium de fonderie**. Effet de moyenne et de biaxialité.
- Caractérisation des mécanismes d'endommagement associés aux **différents modes de chargement** (traction uniaxiale, traction biaxiale et torsion).
- **Mise en évidence de deux mécanismes** : amorçage dans la matrice et microfissuration à partir des pores.
- **Critère multiaxial probabiliste** tenant compte des deux mécanismes suivant le type d'hétérogénéités microstructurales moteur
- Modélisation intégrant **l'effet du dommage au premier 1/4 de cycle**.



# Perspectives

- Evolution de l'exposant de Weibull avec la contrainte moyenne.
- Application de l'approche fiabiliste à d'autres **matériaux à défauts**.
- Validation du modèle de couplage plasticité-endommagement sur une large gamme de matériaux – Campagne expérimentale associée (**Machine de Traction-Torsion-Pression interne**)
- Prise en compte de **l'effet bénéfique de la moyenne** via l'écroissage du matériau.
- Thèse disponible sur le site Pastel de l'école doctorale

Coordonnées :

[Franck.morel@ensam.eu](mailto:Franck.morel@ensam.eu) / 02.41.20.73.36

[Daniel.Bellett@ensam.eu](mailto:Daniel.Bellett@ensam.eu) / 02.41.20.73.27

