

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

r e t u r n   o n   i n n o v a t i o n

[www.onera.fr](http://www.onera.fr)

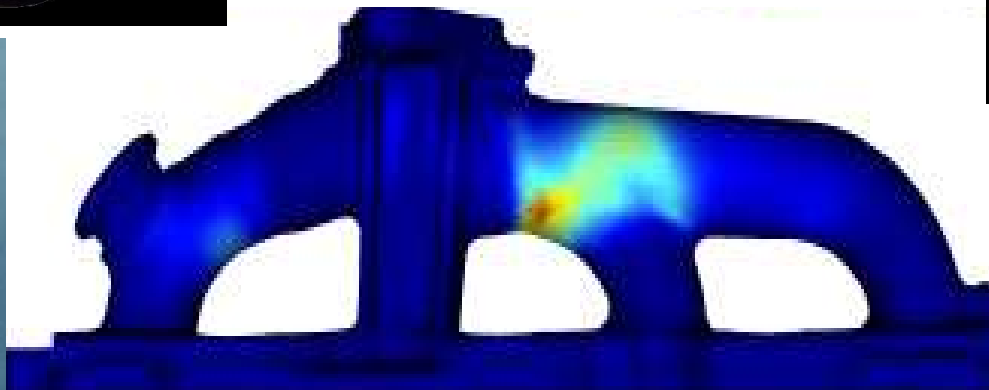
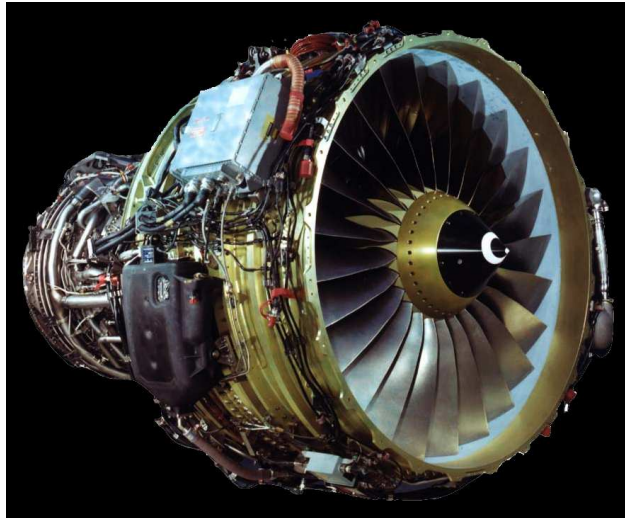
# L'approche Onera pour le cumul des dommages en fatigue sous chargements complexes et température variable

*J.L. Chaboche*

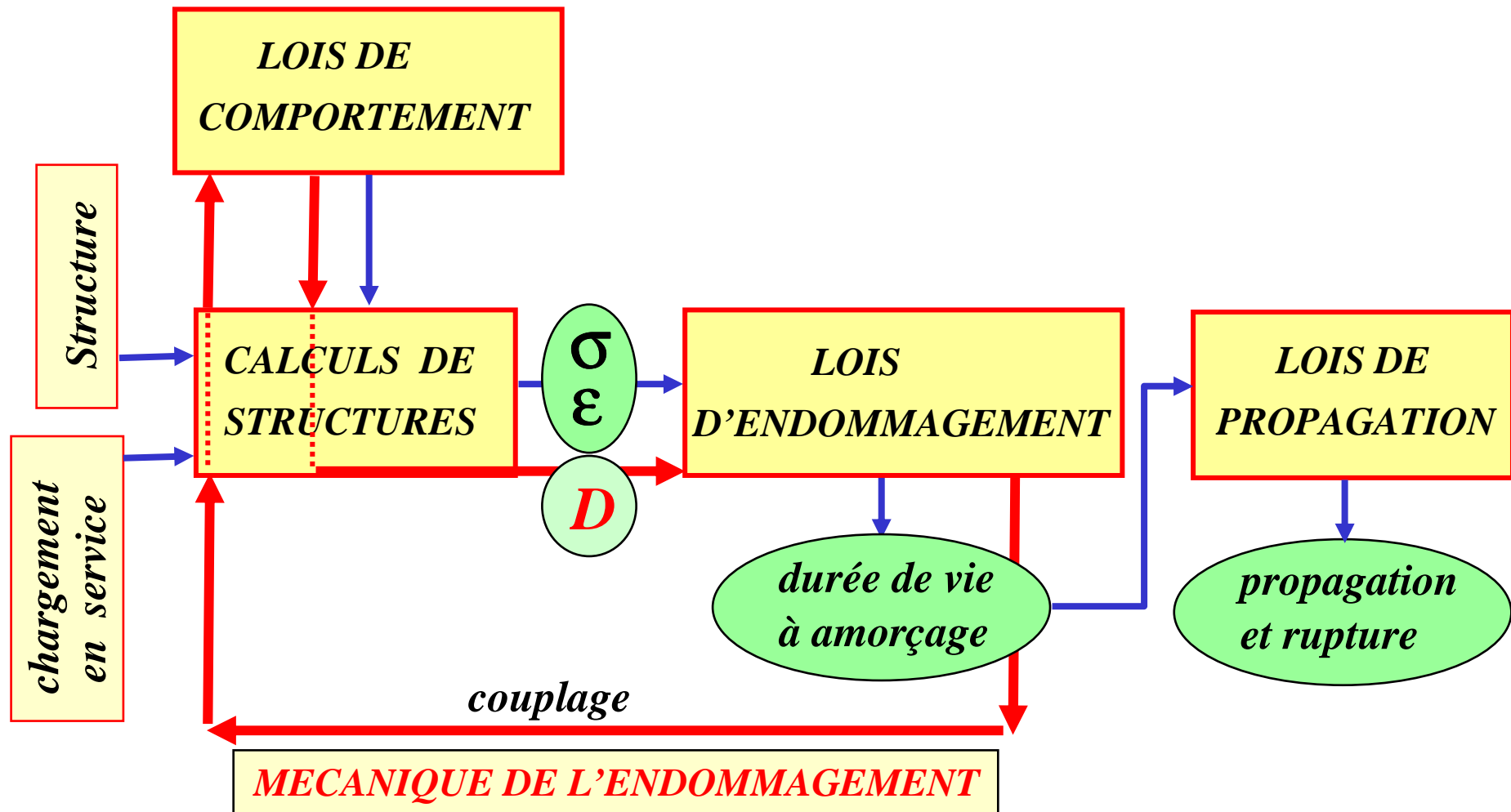
**O.N.E.R.A., Châtillon, France**

*(\*) Jean-Louis.Chaboche@onera.fr*

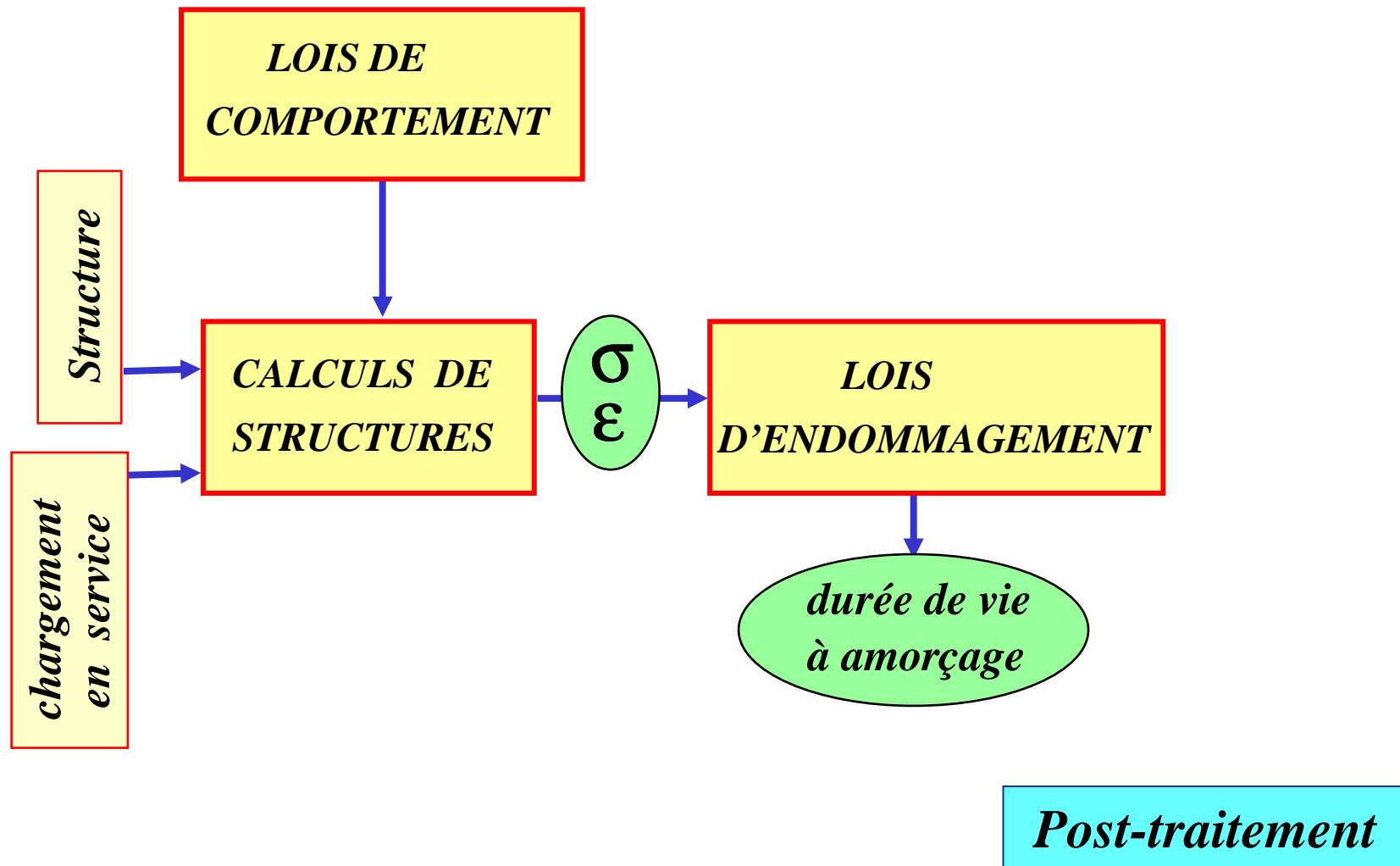
# Pièces soumises à des sollicitations thermomécaniques sévères



# Analyses de durée de vie des structures



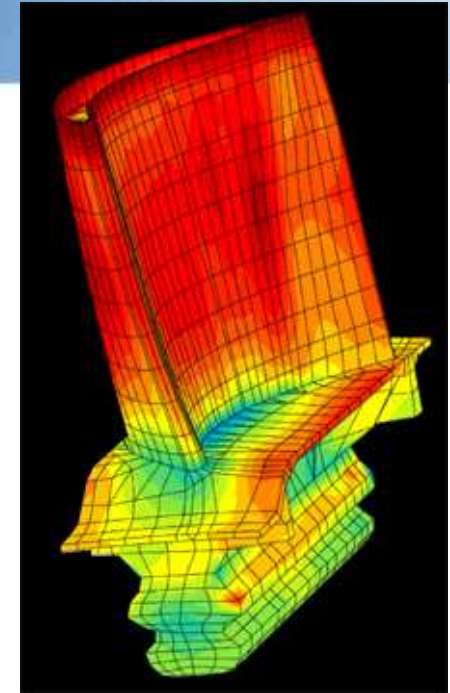
# Analyses de durée de vie des structures





# Fatigue thermomécanique

- ❑ Lois de comportement : élasto-viscoplasticité
- ❑ Analyse inélastique cyclique
- ❑ Loi d'endommagement
  - ❑ *interaction fatigue-fluage*
  - ❑ *interaction fatigue-environnement*
- ❑ Problème de la dépendance en température



*Exposé essentiellement basé  
sur les travaux et approches  
développées par l'ONERA  
en coopération avec Snecma / Turboméca et EMP*

- *retour sur 40 années d'activité*
- *quelques nouvelles propositions*

# Plan de l'exposé

- Loi de comportement**
- Modèle de fatigue pure à cumul non linéaire**
- Modèle d'interaction Fatigue-Fluage**
- Modèle d'interaction Fatigue-Oxydation-Fluage**
- Applications à des éléments structuraux  
sous chargements thermomécaniques cycliques**
- Prise en compte de la température variable**

# Loi de comportement élasto-viscoplastique unifiée

potentiel :

$$\Omega = \frac{K}{n+1} \left\langle \frac{J(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R - k}{K} \right\rangle^{n+1}$$

Chaboche, 1977

contrainte seuil

normalité :

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \frac{\partial \Omega}{\partial \underline{\sigma}} = \dot{p} \frac{3}{2} \frac{\underline{\sigma}' - \underline{X}'}{J(\underline{\sigma} - \underline{X})} = \dot{p} \underline{n}$$

contrainte de trainée

multiplicateur :

$$\dot{p} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_v} = \left\langle \frac{J(\underline{\sigma} - \underline{X}) - R - k}{K} \right\rangle^n = \sqrt{\frac{2}{3} \underline{\dot{\epsilon}}^p : \underline{\dot{\epsilon}}^p}$$

écrouissage  
cinématique :

$$\underline{X} = \sum_i \underline{X}_i$$

Armstrong-Frederick, 1966 :

$$\underline{\dot{X}}_i = \frac{2}{3} C_i \underline{\dot{\epsilon}}^p - \gamma_i \underline{X}_i \dot{p}$$

restauration dynamique

superposition de l'écrouissage isotrope :

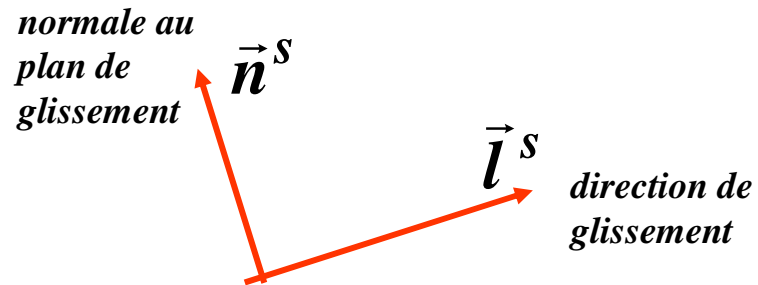
- sur le seuil :  $R$
- sur le module d'écrouissage :  $\gamma = \gamma(R)$
- sur la contrainte de « trainée » :  $K = K(R)$

module d'écrouissage



# Loi de comportement viscoplastique du monocristal

*critère de Schmid :*



$$\underline{m}^s = \frac{1}{2} (\vec{n}^s \otimes \vec{l}^s + \vec{l}^s \otimes \vec{n}^s)$$

*contrainte résolue :*

$$\tau_s = \vec{n}^s \cdot \underline{\sigma} \cdot \vec{l}^s = \underline{m}^s : \underline{\sigma}$$

$$f_s = |\tau_s| - r_s \leq 0$$

*modèle de Cailletaud (1987)*

*en viscoplasticité :*

$$f_s = |\tau_s - x_s| - r_s$$

$$\dot{v}_s = \left\langle \frac{f_s}{K_s} \right\rangle^n$$

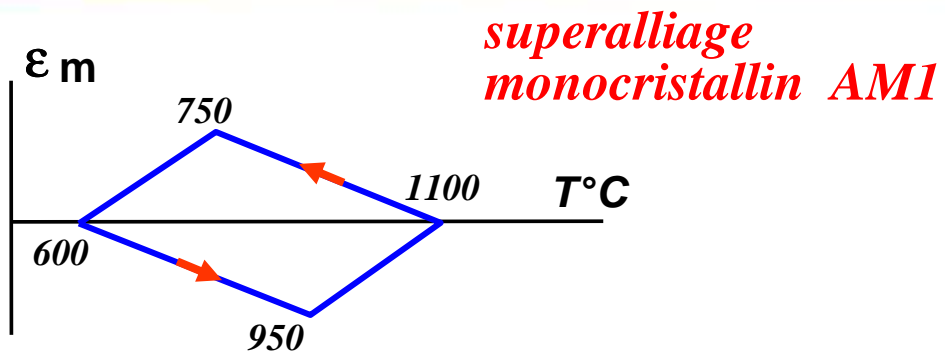
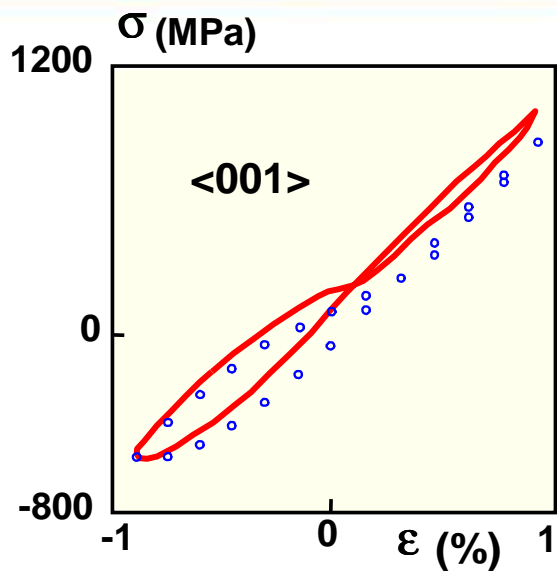
$$\dot{\gamma}_s = \dot{v}_s \operatorname{Sg}(\tau_s - x_s)$$

$$\dot{x}_s = c \dot{\gamma}_s - d_s |\dot{\gamma}_s|$$

$$r_r = Q \sum_s h_{rs} (1 - \exp(-b v_s))$$

*matrice d'écrouissage  
(interactions entre systèmes)*

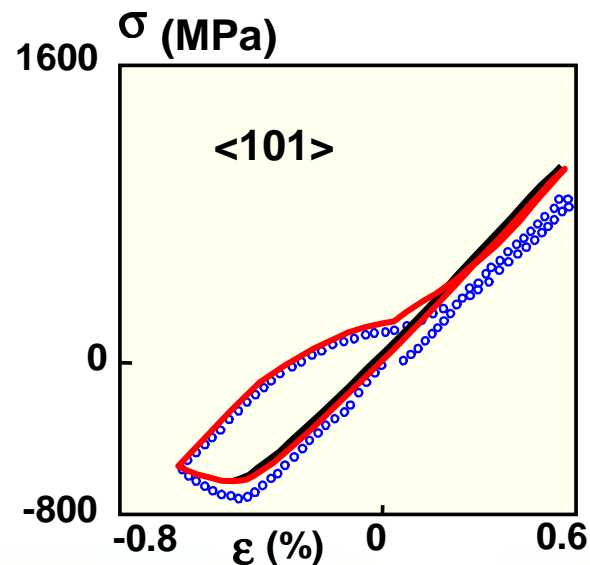
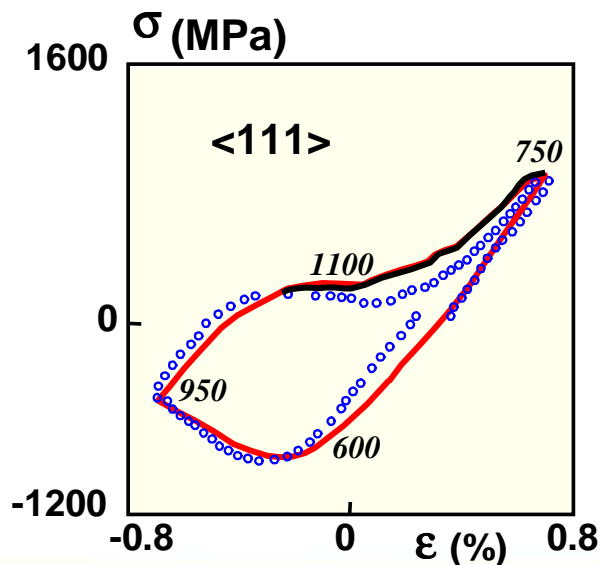
# Essais de fatigue thermomécanique



Essais : ○ ○ ○ AM1 (essais ENSMP)

Models : — macroscopique

— viscoplasticité cristalline



# Plan de l'exposé

Loi de comportement

**Modèle de fatigue pure à cumul non linéaire**

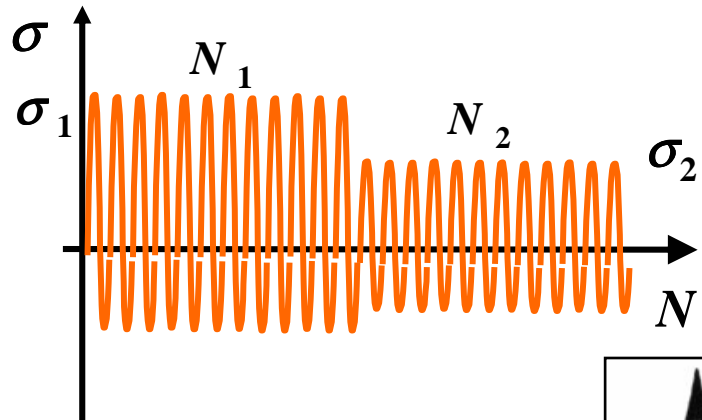
Modèle d'interaction Fatigue-Fluage

Modèle d'interaction Fatigue-Oxydation-Fluage

Applications à des éléments structuraux  
sous chargements thermomécaniques cycliques

Prise en compte de la température variable

# Cumul des dommages – Effets de séquence dans les essais à 2 niveaux



Acier 4340

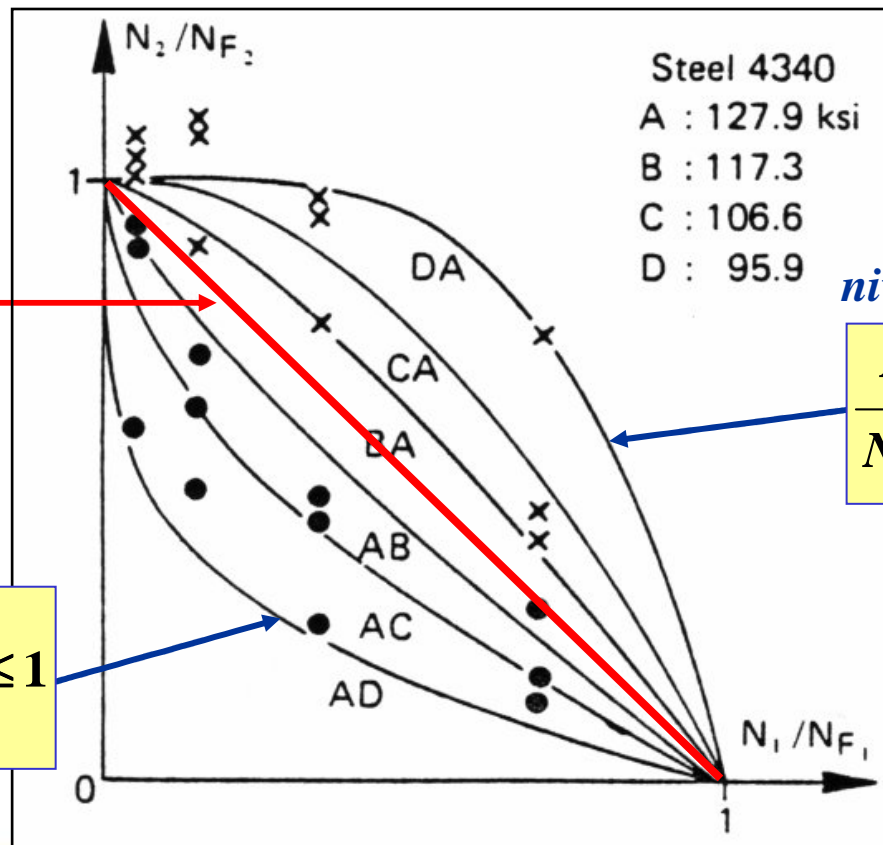
Règle de Miner

niveaux décroissants :

$$\frac{N_1}{N_{f_1}} + \frac{N_2}{N_{f_2}} \leq 1$$

niveaux croissants :

$$\frac{N_1}{N_{f_1}} + \frac{N_2}{N_{f_2}} \geq 1$$

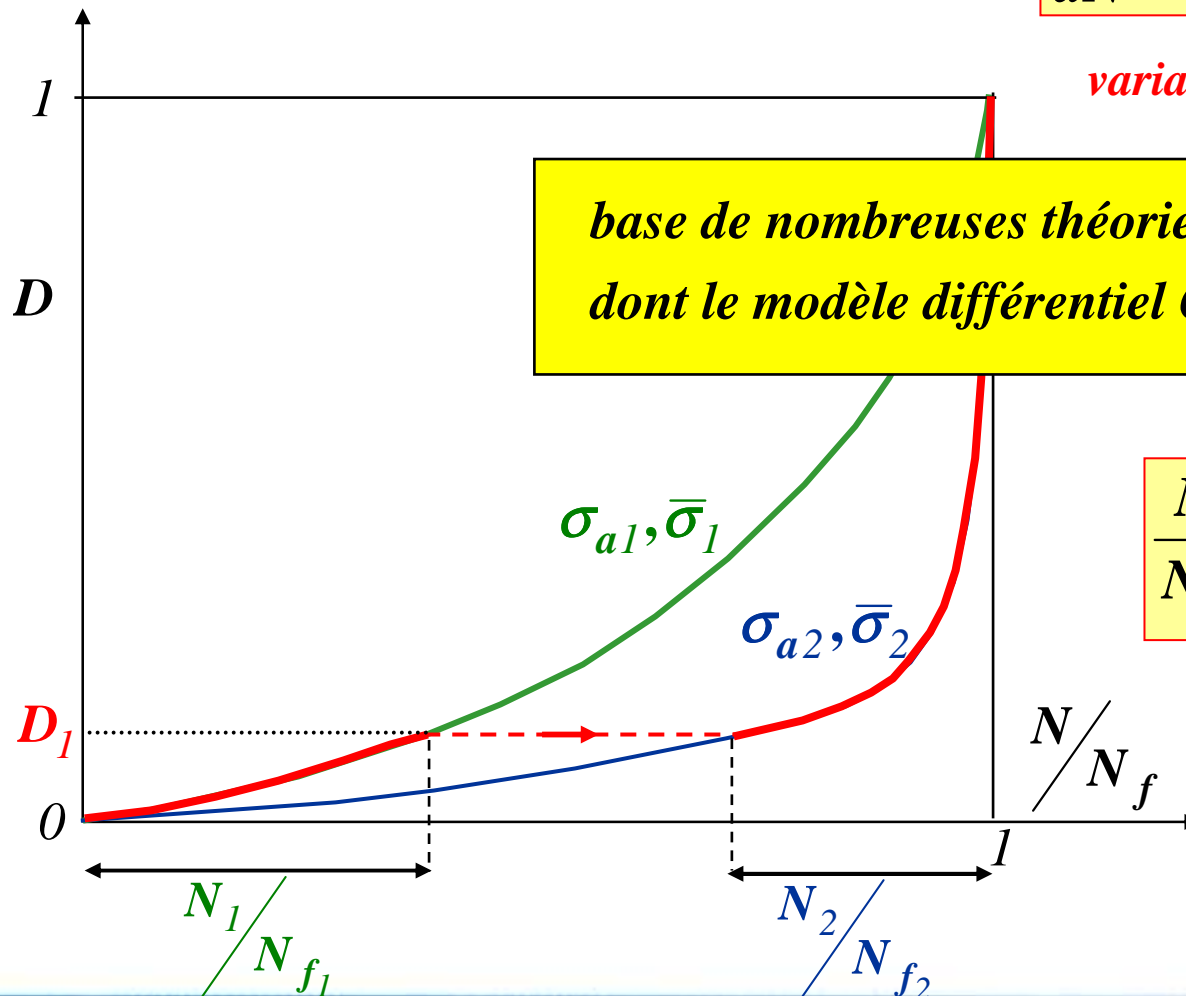


# Bases du cumul non linéaire des dommages

*exemple : fatigue (uniaxiale)*

$$\frac{dD}{dN} = F_f(\sigma_a, \bar{\sigma}, D)$$

*variables non séparables*



$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} \leq 1$$

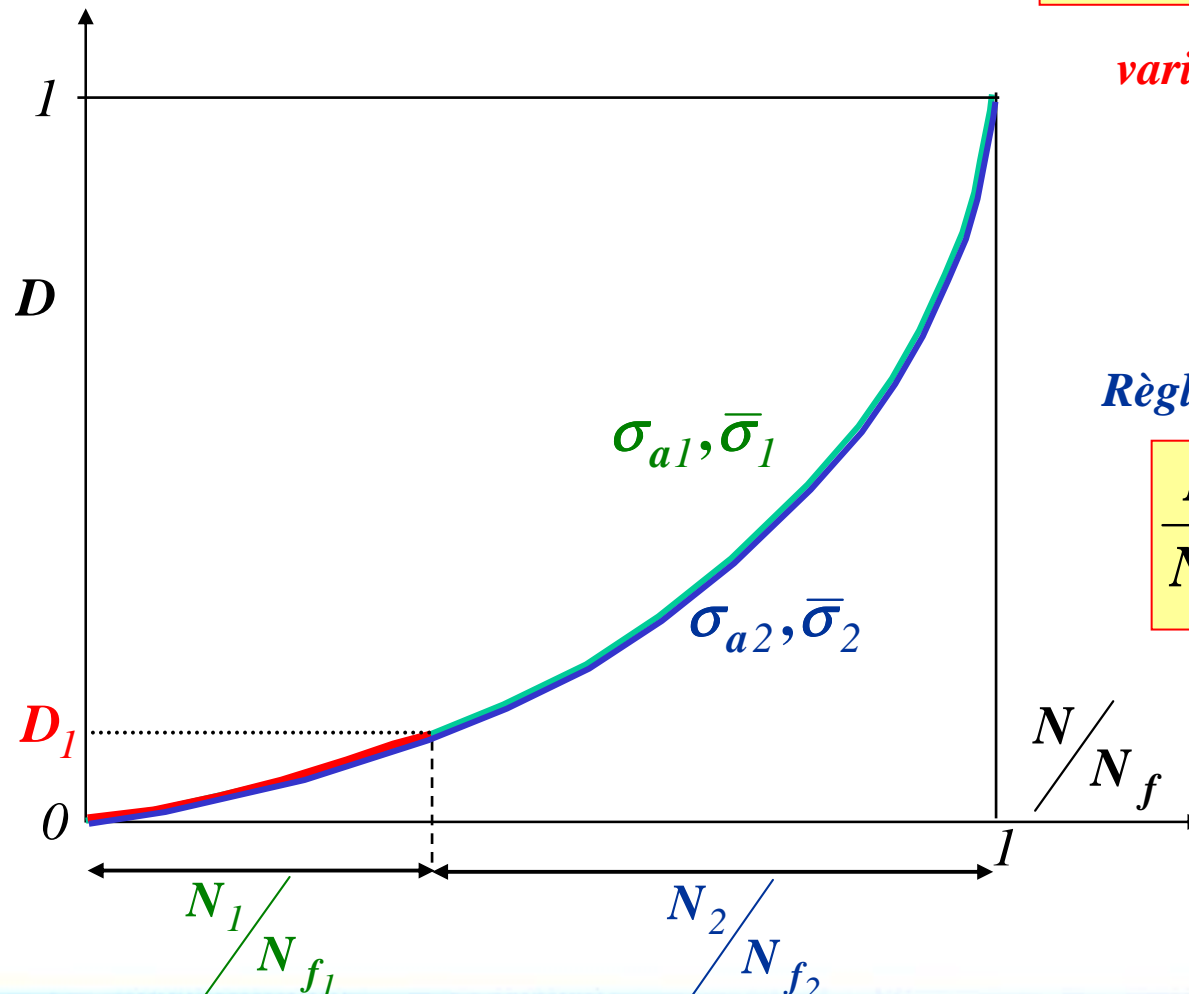


# Cumul linéaire des dommages

*exemple : fatigue (uniaxiale)*

$$\frac{dD}{dN} = F_f(\sigma_a, \bar{\sigma}) \phi(D)$$

*variables séparables*



*Règle de Miner :*

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} = 1$$

# Cumul non linéaire du dommage : modèle Onera classique

Loi d'évolution différentielle :

(1978)

$$dD = D^{\alpha(\dots)} \left( \frac{\sigma_a}{M(\dots)} \right)^{\beta} dN$$

Point clé :

$\alpha$  fonction du chargement

forme de la fonction alpha (1978) :

$$1 - \alpha = a \frac{\langle \sigma_a - \sigma_l(\dots) \rangle}{\langle \sigma_u - \sigma_{max} \rangle}$$

$\alpha = 1$  sous la limite de fatigue

effets de contrainte moyenne contenus dans les fonctions  $M(\dots)$  et  $\sigma_l(\dots)$

$$\sigma_l = \sigma_D (1 - b \sigma_{moy})$$

$$M = M_o (1 - b' \sigma_{moy})$$

intégration entre  
 $D = 0$  et  $D = 1$   
(chargement périodique)

$$N_f = \frac{1}{1 - \alpha} \left( \frac{\sigma_a}{M(\dots)} \right)^{-\beta} = \frac{\langle \sigma_u - \sigma_{max} \rangle}{a \langle \sigma_a - \sigma_l(\dots) \rangle} \left( \frac{\sigma_a}{M(\dots)} \right)^{-\beta}$$

courbes de Wöhler avec deux asymptotes

# Cumul non linéaire du dommage : généralisation de la formulation Onera

(2006)

$$dD = \frac{D^{\alpha(\dots)}}{1 - \alpha} \frac{dN}{N_f(\dots)} = D^{\alpha(\dots)} \frac{dN}{N_f^*(\dots)}$$

*l'expression de  $N_f$   
peut être quelconque*

**CHOIX LIBRE**

→  $1 - \alpha = \frac{N_f^*(\dots)}{N_f(\dots)}$

→ *loi « cachée »*

→ *courbe SN de référence*

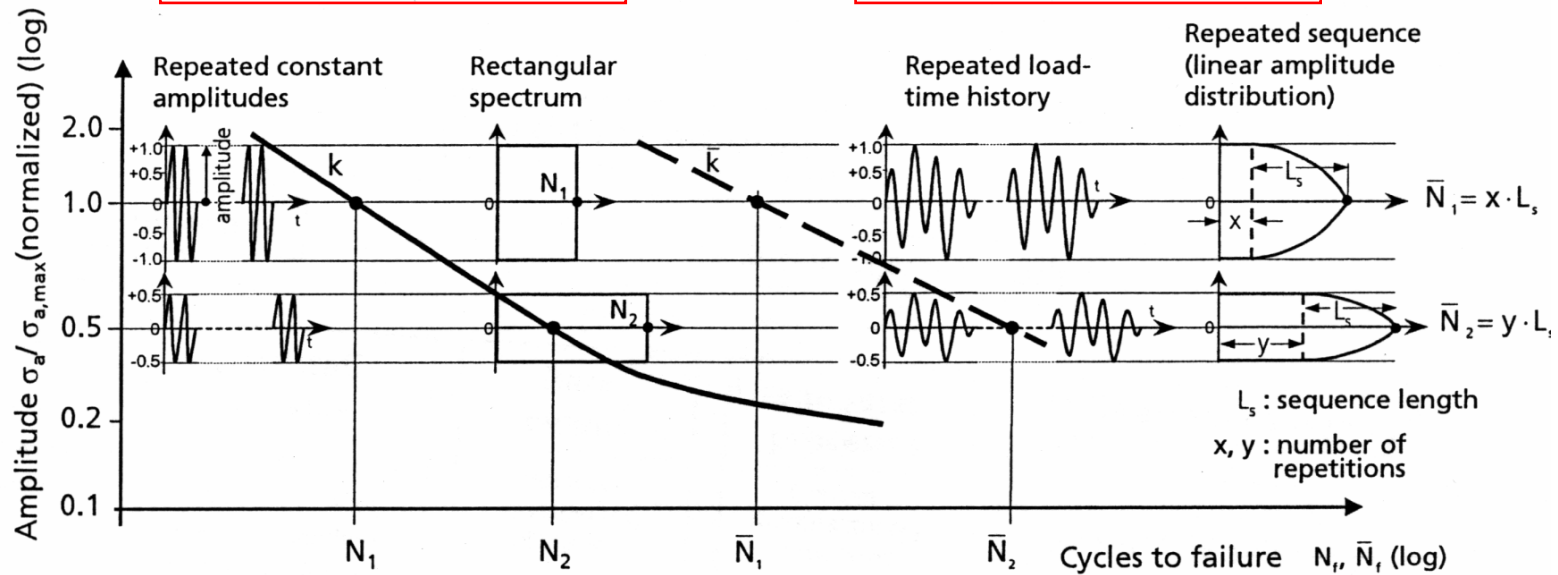
- Réunion SF2M-GT4, 6.07.2006

- Chapitre "Cumul des dommages"  
La Fatigue des Matériaux et des  
Structures (Tome 4),  
Pineau-Bathias Eds, Hermès, 2008

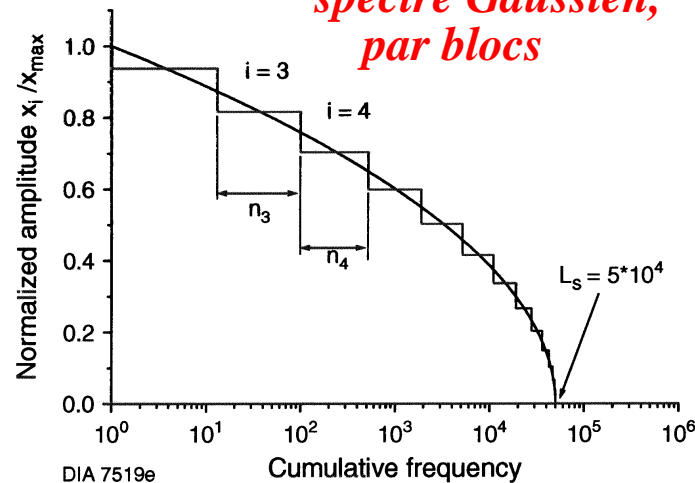
# Chargements spectraux ou par blocs (Gassner)

Constant amplitude loading -  
- Woehler curve -

Variable amplitude loading -  
- Gassner curve -



*spectre Gaussien,  
par blocs*

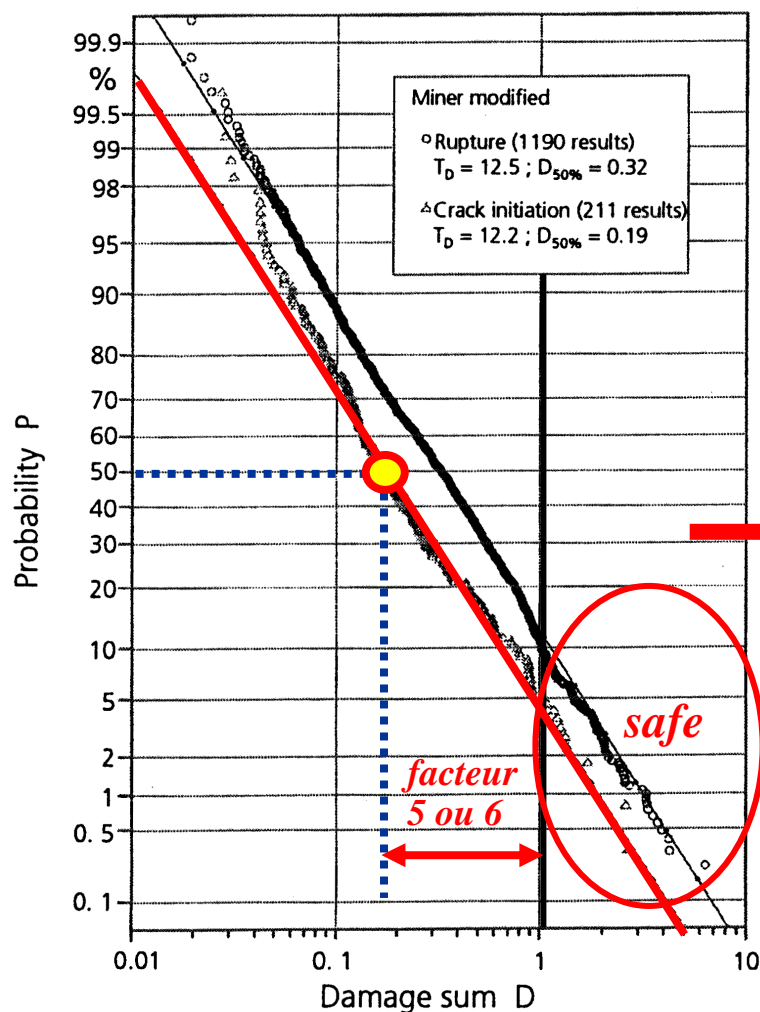


$i$	$x_i$	$n_i$
1	1.000	1
2	0.938	12
3	0.817	87
4	0.704	418
5	0.600	1377
6	0.504	3256
7	0.417	5768
8	0.337	7964
9	0.267	8859
10	0.204	8156
11	0.150	6325
12	0.104	4158
13	0.067	2285
14	0.037	997
15	0.017	299
16	0.004	38
		$\sum n_i = L_s = 50000$

*tiré des travaux de  
C.M. Sonsino (L.B.F.)*

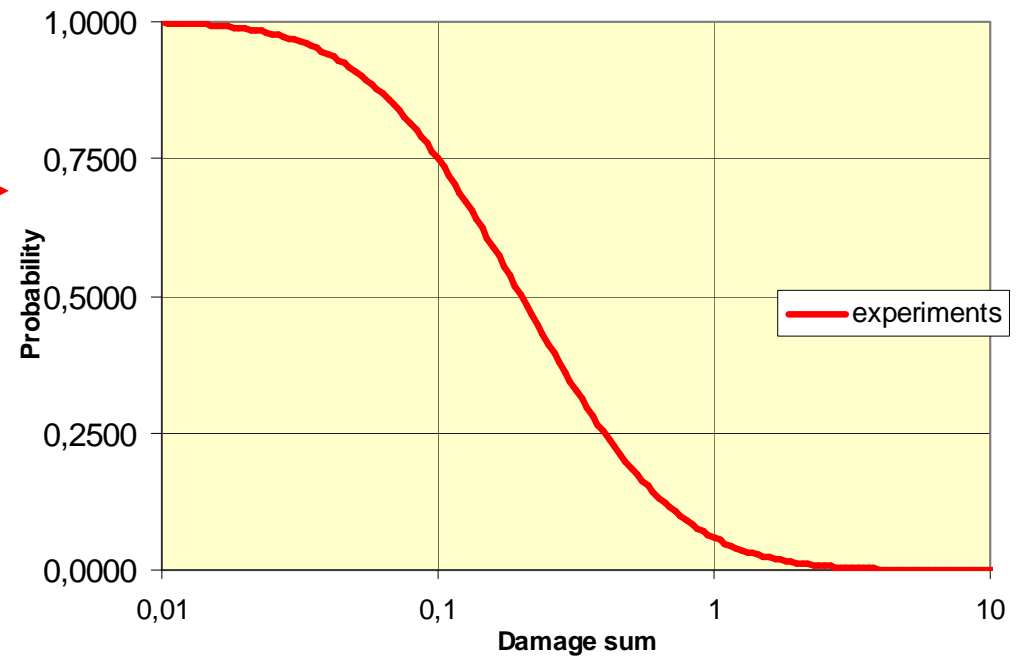
*J.I.P. 2006, Paris*

# En moyenne, la « réalité » est encore plus « sévère »



Damage sum : 
$$D_{sum} = \sum \frac{n_i}{N_{f_i}}$$

Basée sur courbes SN à deux pentes :  $\gamma$  et  $\gamma^* = 2\gamma - 2$



*Eulitz, K.G., Kotte, K.L.,  
Materials Week 2000, Frankfurt, Sept. 2000  
cité par C. M. Sonsino, ASTM STP 1439, 2005*



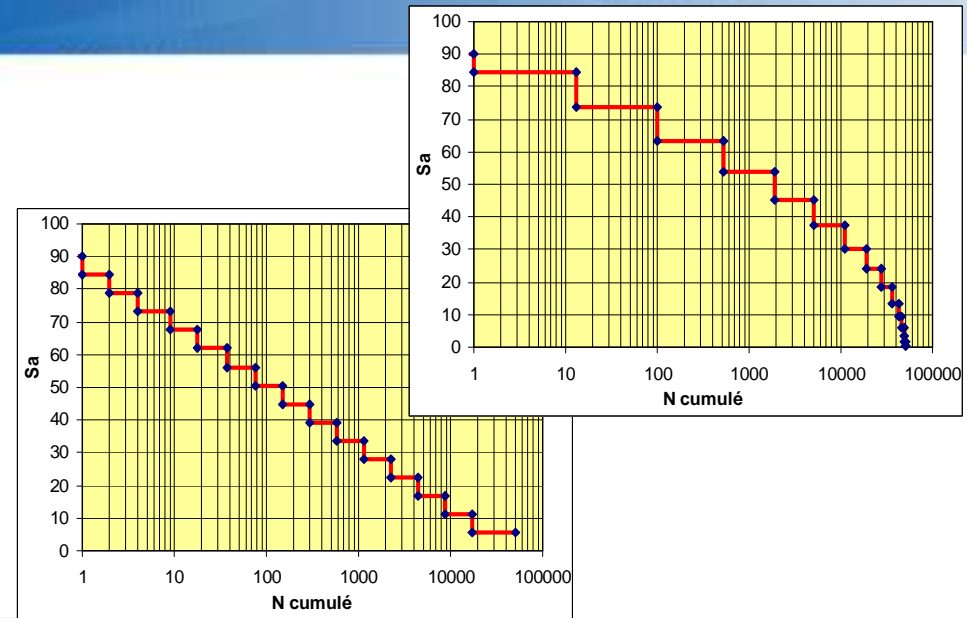
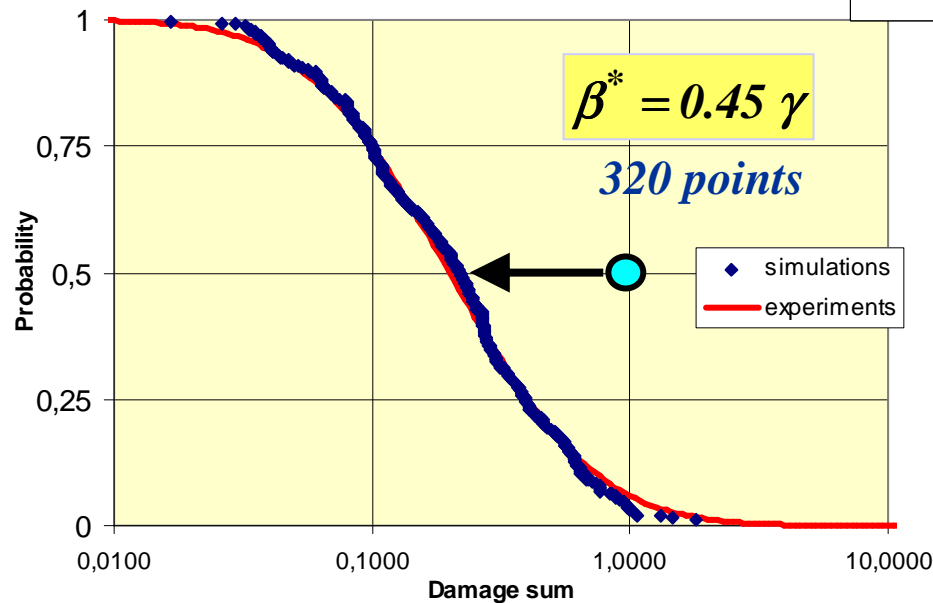
# Prediction de ces résultats

620 conditions :

*différents niveaux de maxima,  
spectres linéaires ou Gaussiens  
différentes pentes  $\gamma$*

*dispersion naturelle prise en compte :*

*14 % variation en contrainte*

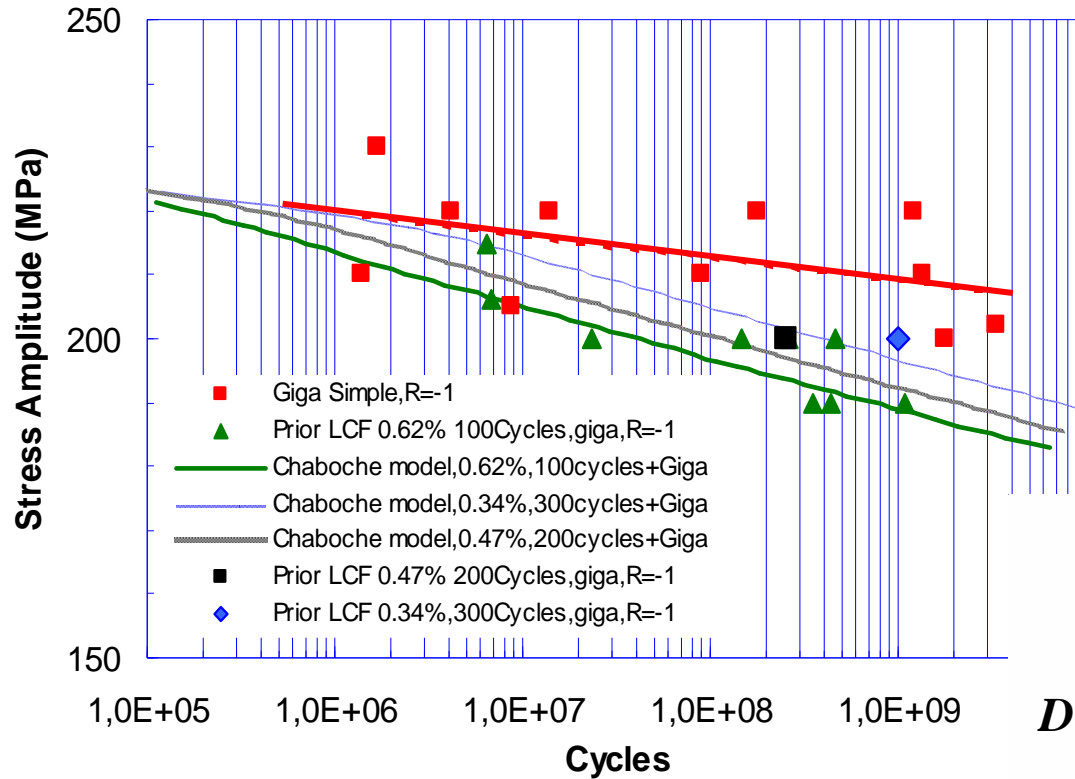


*Les modèles de cumul non linéaire sont capables de traduire l'écart à la règle de Miner*

*Chaboche et al., Darmstadt, 2009*

# A recent application to gigacycle fatigue regime

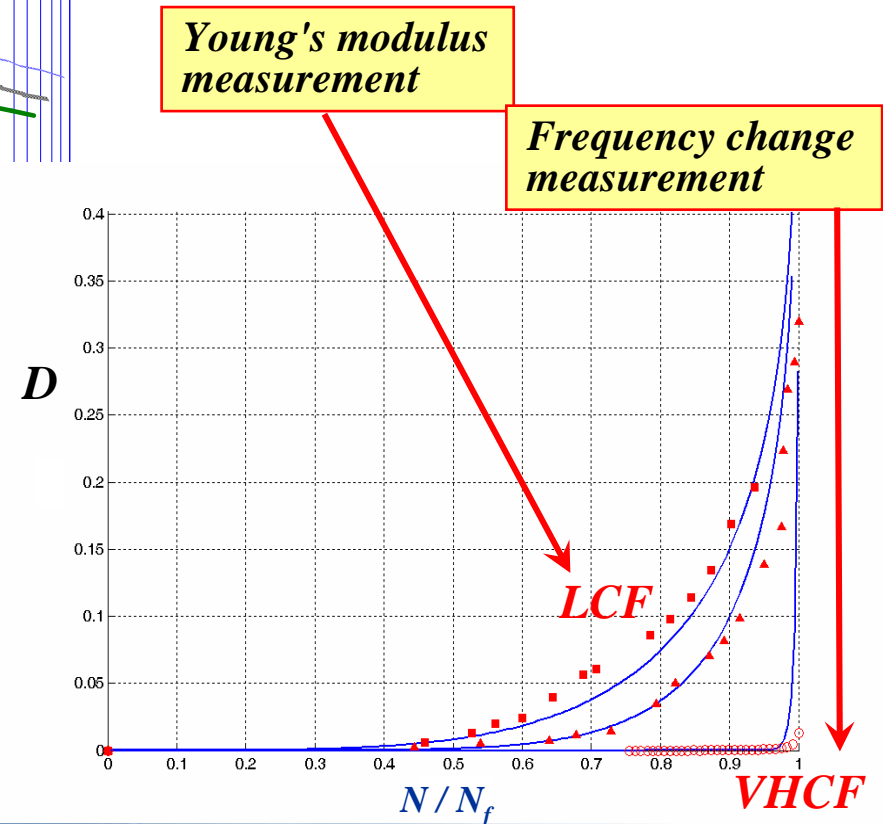
*Huang Ph.D. Thesis, 2010*  
*Huang et al., 2011*



**A 42 C-Mn steel**

**Prior LCF strain control**

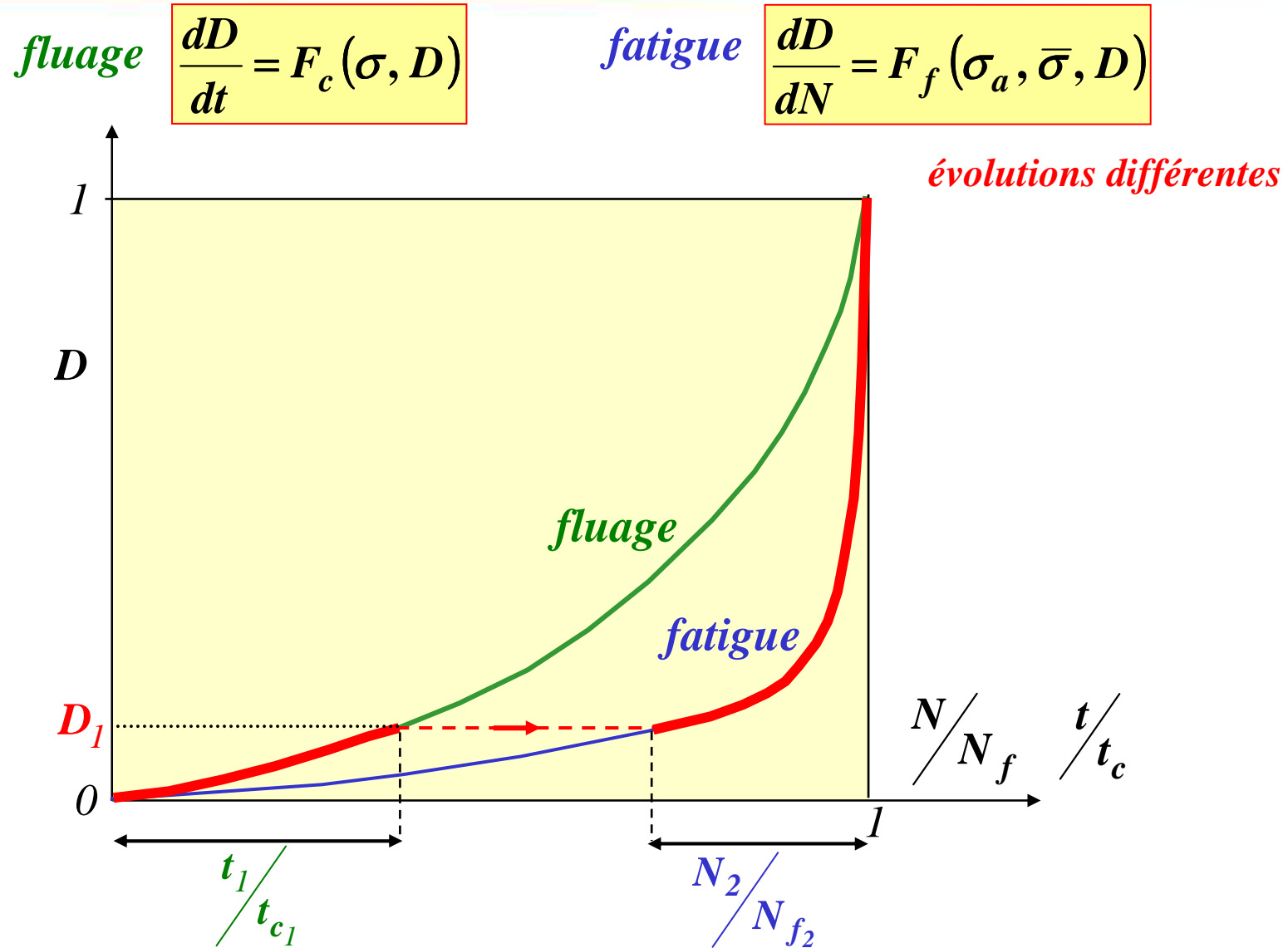
**0.34, 0.47, 0.62 % strain amplitude**



# Plan de l'exposé

- ❑ Loi de comportement
- ❑ Modèle de fatigue pure à cumul non linéaire
- ❑ **Modèle d'interaction Fatigue-Fluage**
- ❑ Modèle d'interaction Fatigue-Oxydation-Fluage
- ❑ Applications à des éléments structuraux  
sous chargements thermomécaniques cycliques
- ❑ Prise en compte de la température variable

# Interaction non-linéaire fatigue fluage (modèle FatFlu)



# Interaction non-linéaire fatigue fluage (modèle FatFlu)

*fluage*  $\frac{dD_c}{dt} = F_c(\sigma, D_c)$

*fatigue*  $\frac{dD_f}{dN} = F_f(\sigma_a, \bar{\sigma}, D_f)$

*accumulation des deux dommages à chaque cycle :*

$$dD = dD_c + dD_f = F_c(\sigma, D_c, D_f)dt + F_f(\sigma_a, \bar{\sigma}, D_f, D_c)dN$$

*effets d'interaction*

*hypothèse : interaction additive :*

$$dD = dD_c + dD_f = F_c(\sigma, D_c + D_f)dt + F_f(\sigma_a, \bar{\sigma}, D_f + D_c)dN$$

$$dD = F_c(\sigma, D)dt + F_f(\sigma_a, \bar{\sigma}, D)dN$$

*intégration du fluage à chaque cycle :*

$N_c$  = *prévision fluage pur*

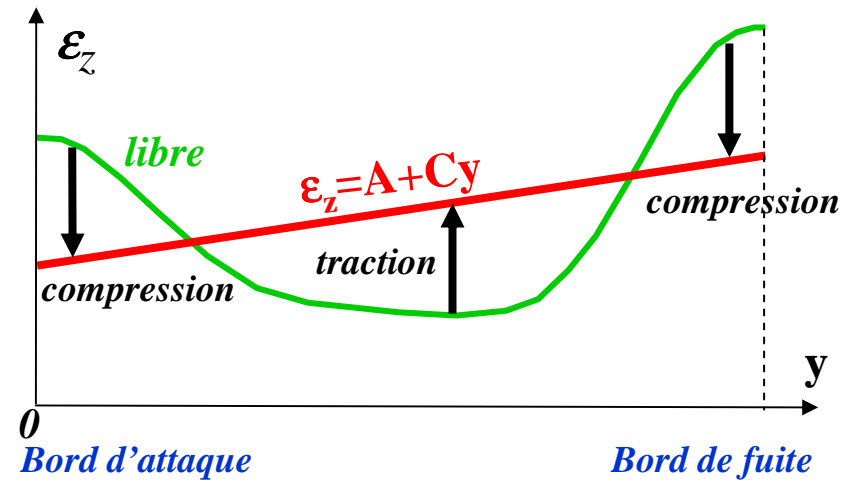
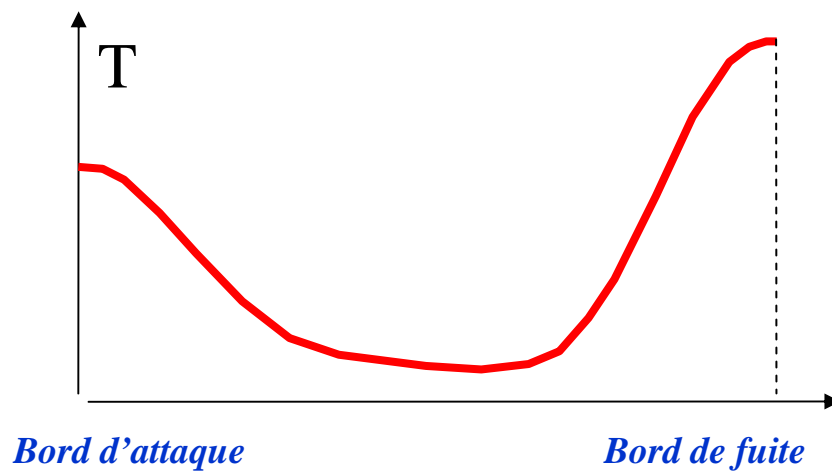
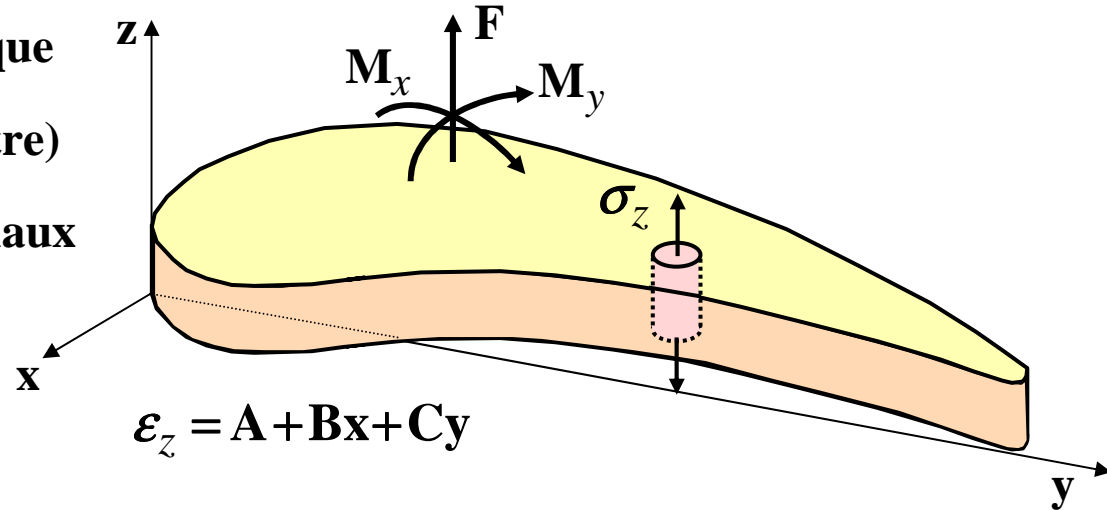
$N_f$  = *prévision fatigue pure*

$$dD = \frac{\phi_c(D)}{N_c} dN + \frac{\phi_f(D)}{N_f} dN$$



# Méthode des « tranches planes » : depuis les années 70

- ❑ Contraintes d'origine thermique
- ❑ Hypothèse de Bernouilli (poutre)
- ❑ Découpage en éléments uniaxiaux



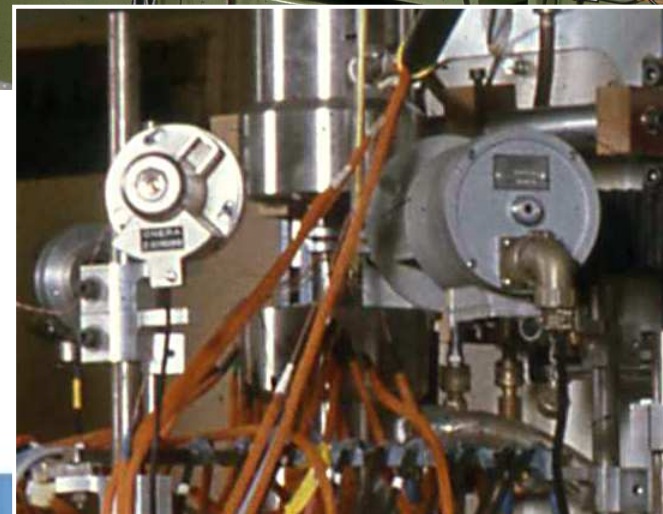
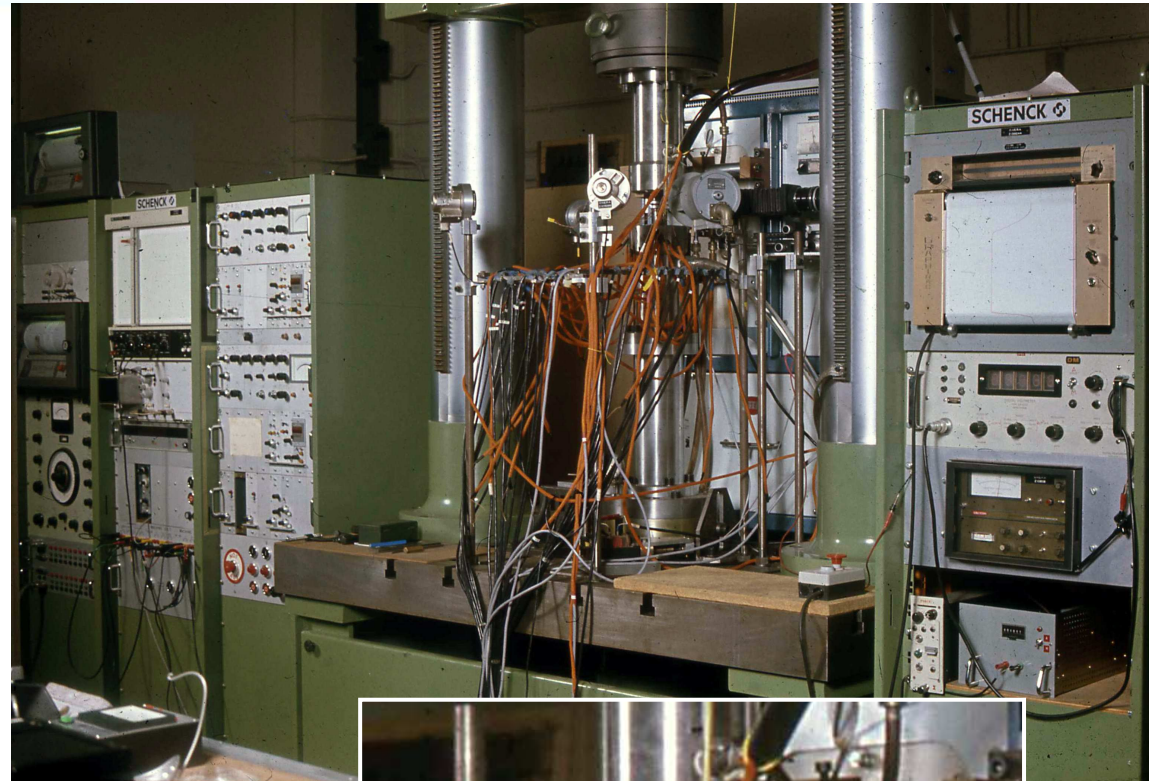
# Validation de la loi de cumul non linéaire fatigue-fluage

**SNECMA**



*superalliage  
base Nickel  
IN 100*

*M53 1st stage turbine blade (15 channels)  
tested in ONERA lab (1973-74)*

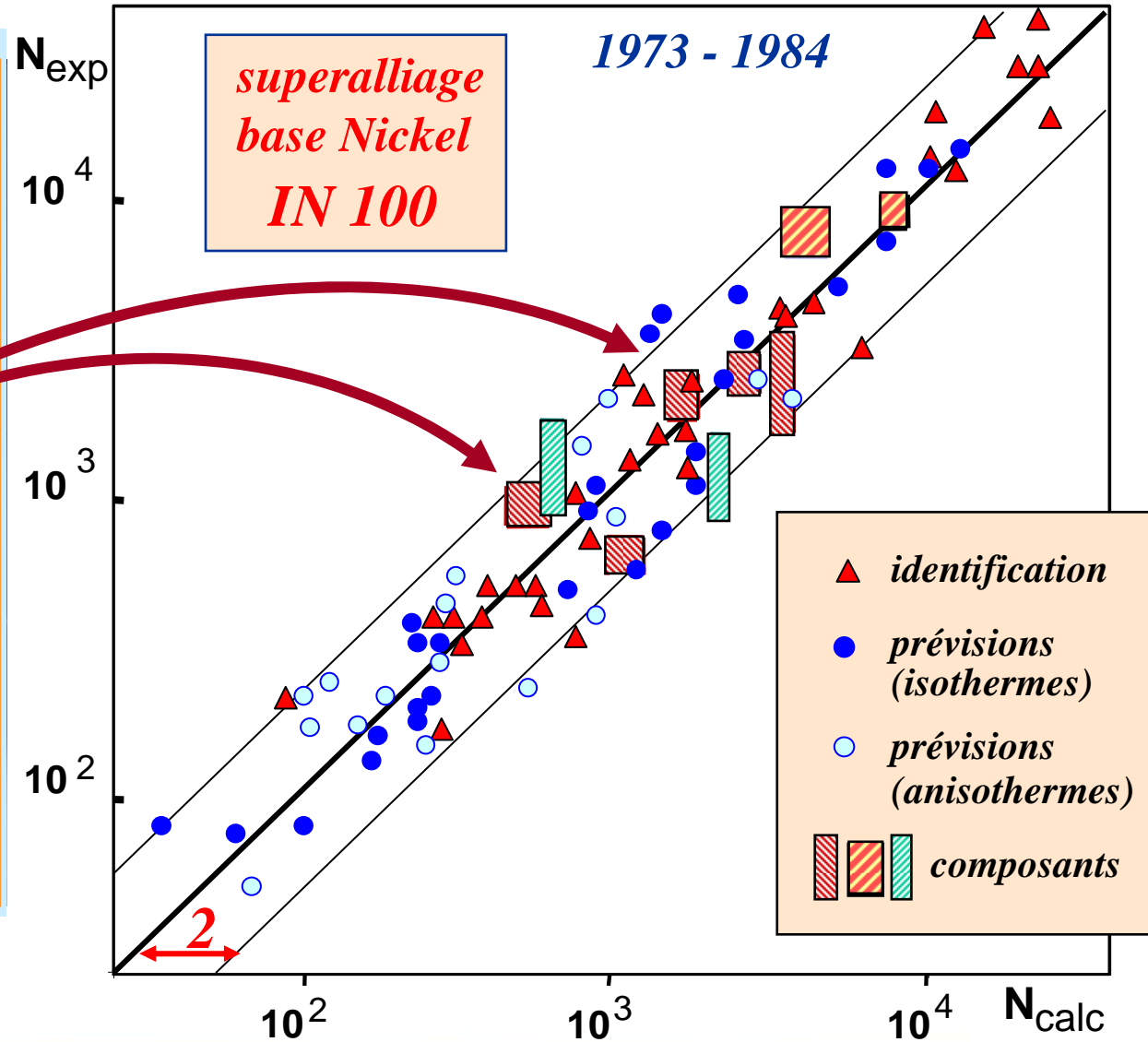


# Validation de la loi de cumul non linéaire fatigue-fluage

SNECMA



*1<sup>er</sup> étage aubes de turbine M53  
(15 canaux) essais ONERA (1973)*

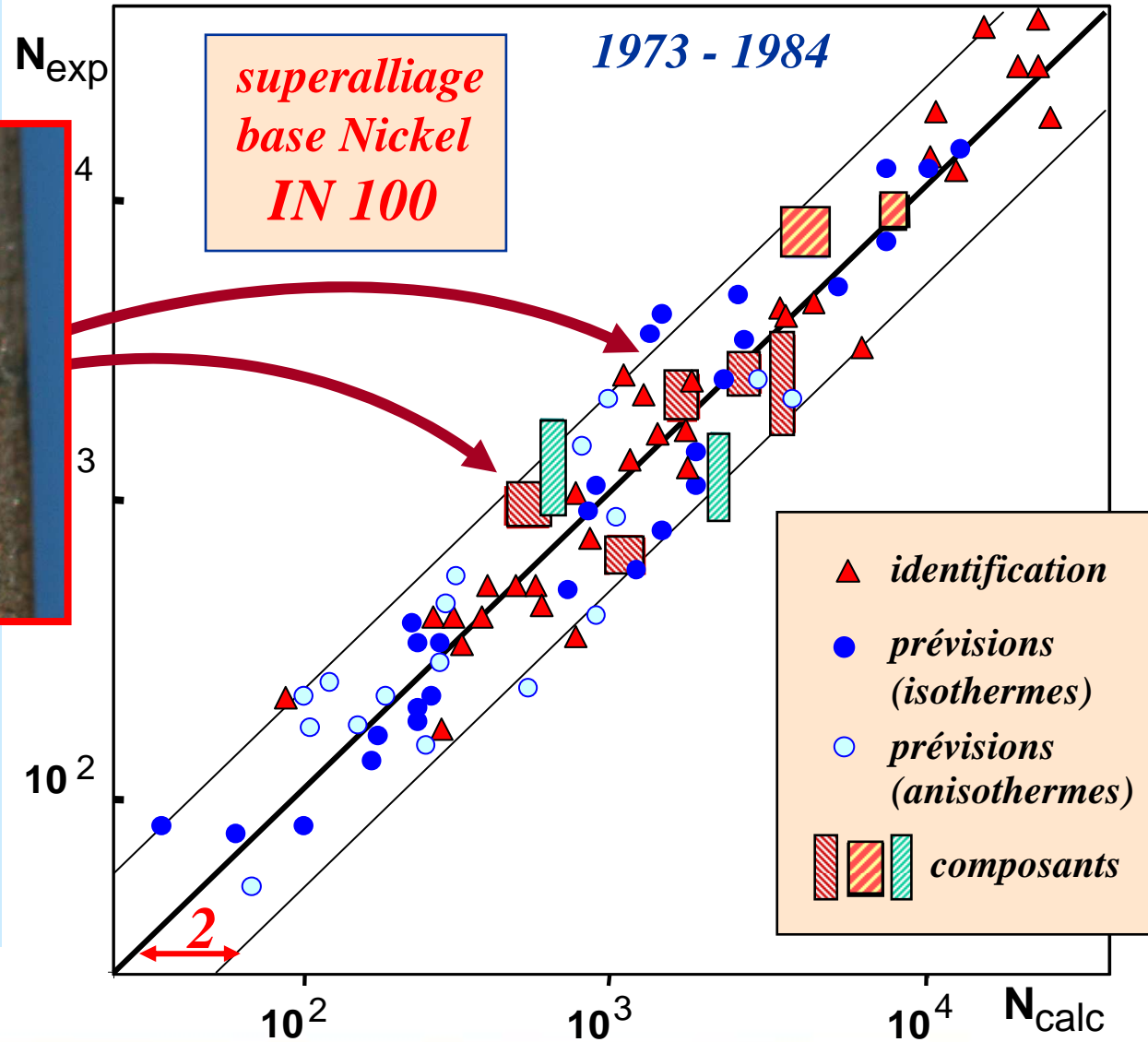




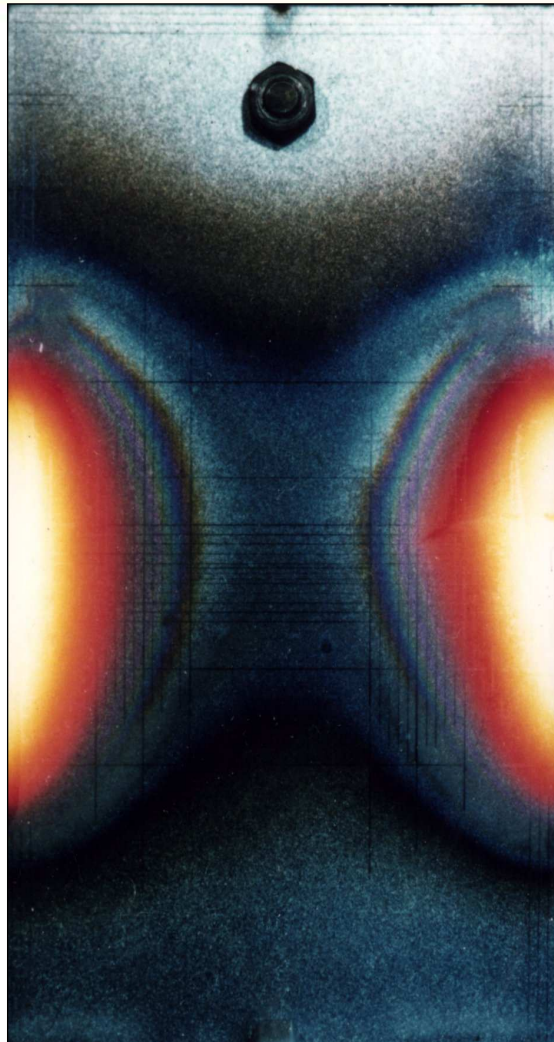
# Validation de la loi de cumul non linéaire fatigue-fluage



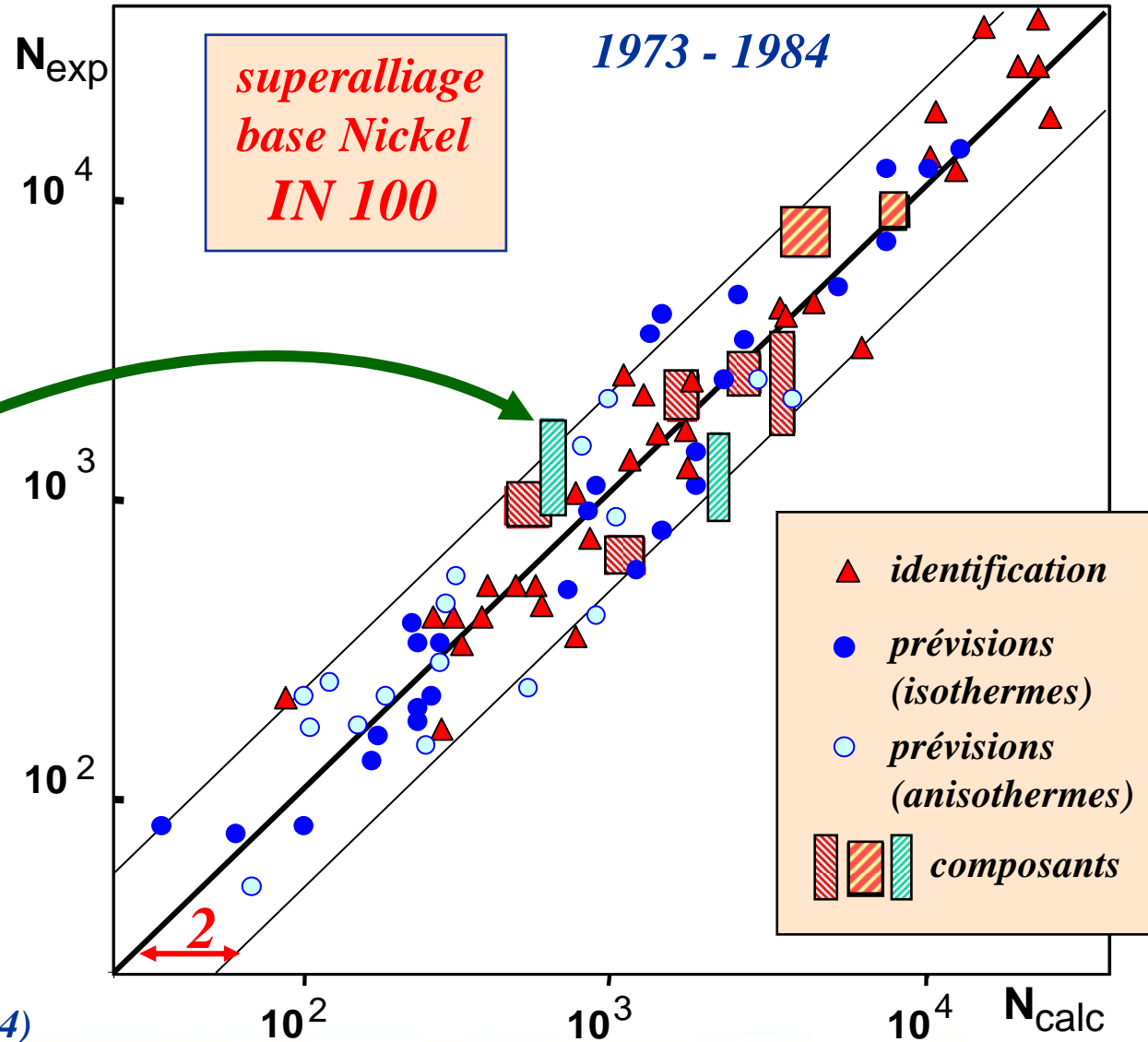
1<sup>er</sup> étage aubes de turbine M53  
(15 canaux) essais ONERA (1973)



# Validation de la loi de cumul non linéaire fatigue-fluage



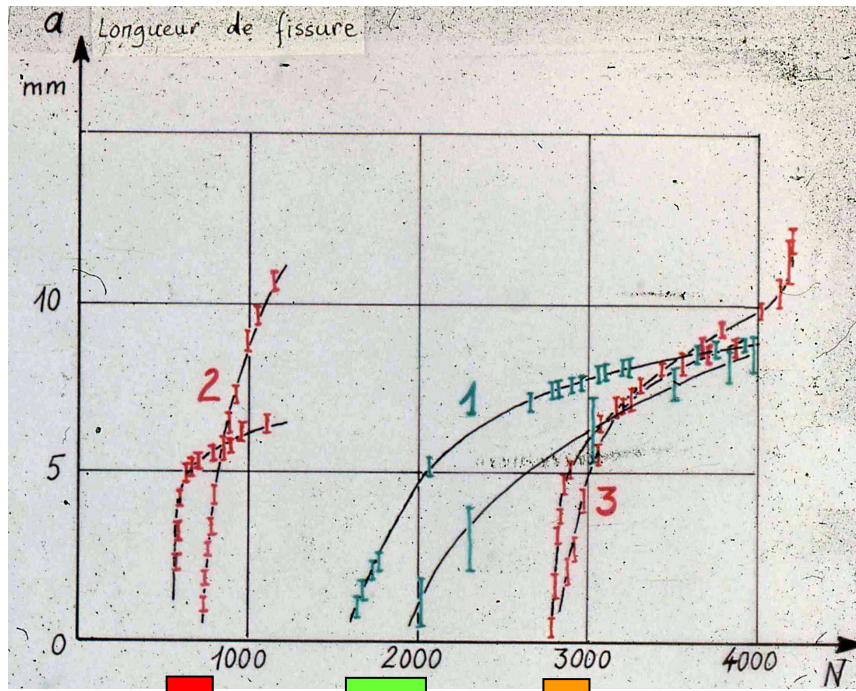
Plaque IN100 avec gradients thermiques cycliques (Lesne, 1984)



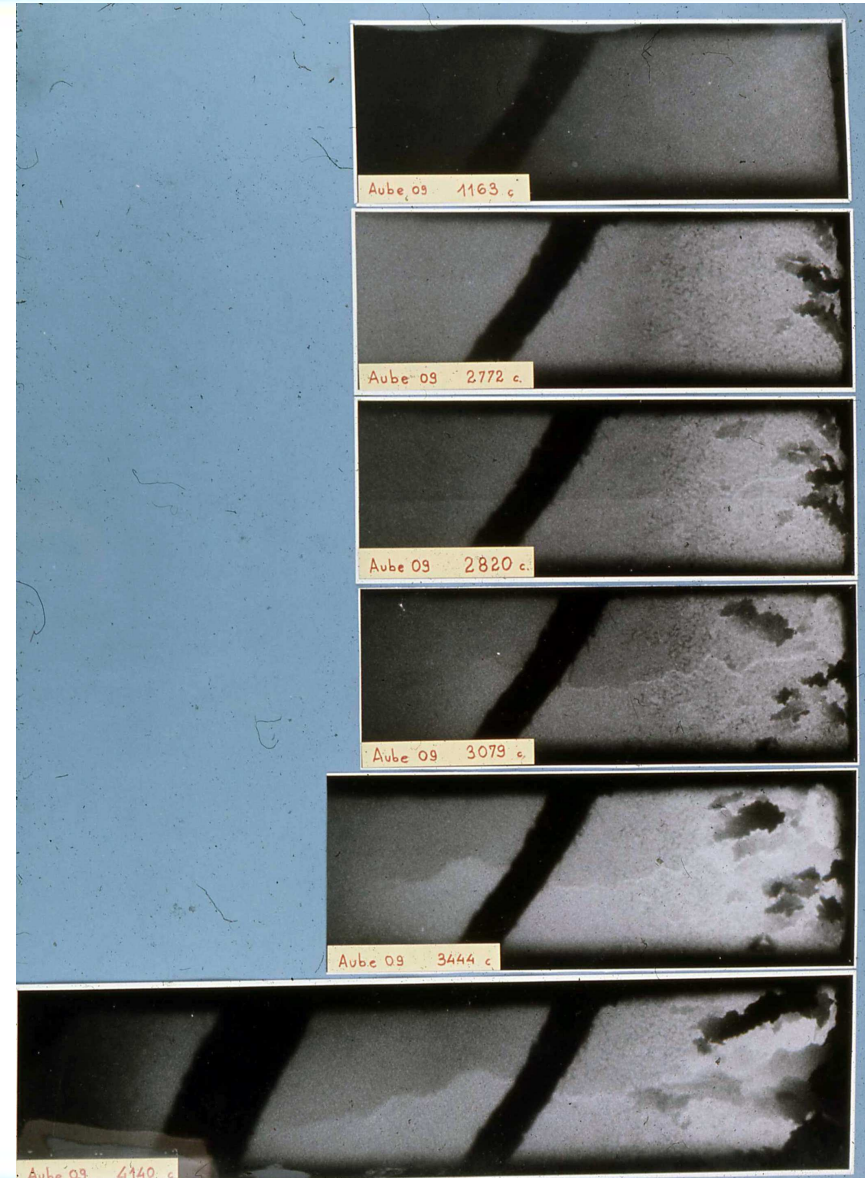


# Validation de la loi de cumul non linéaire fatigue-fluage

		$T_{TE}$	F	$t_m$
1	Décollage	1090	3650	493
2	Survitesse 10 min.	1135	3750	493
3	Survitesse 5 min.	1107	3680	186
		°C	daN	Sec.



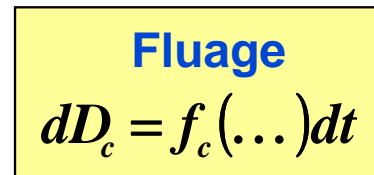
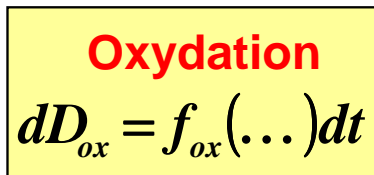
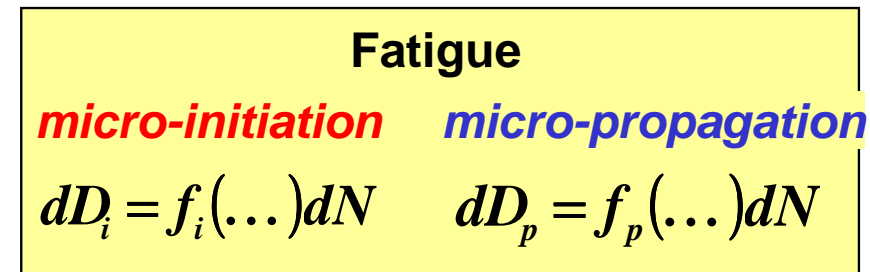
mesures DDV amorçage



# Plan de l'exposé

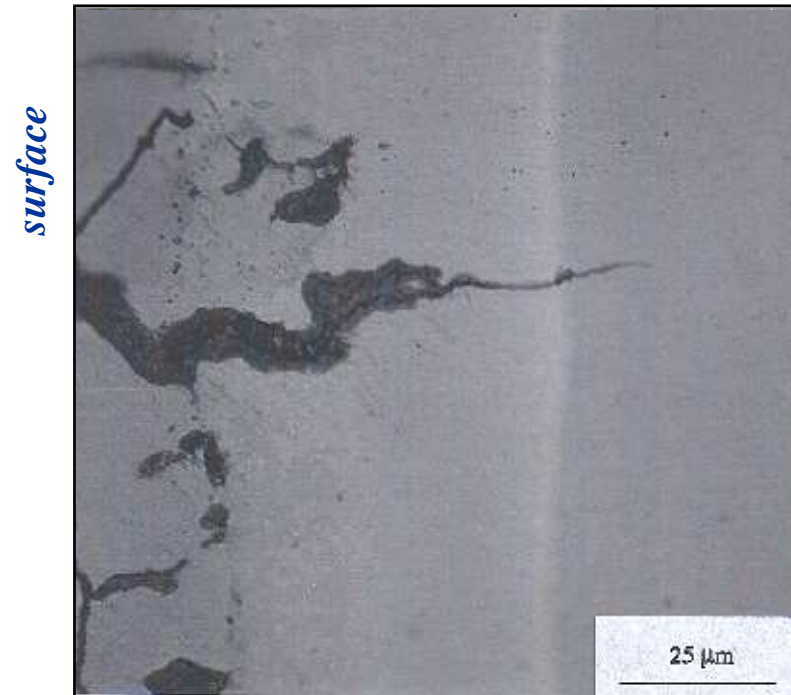
- ❑ Loi de comportement
- ❑ Modèle de fatigue pure à cumul non linéaire
- ❑ Modèle d'interaction Fatigue-Fluage
- ❑ **Modèle d'interaction Fatigue-Oxydation-Fluage**
- ❑ Applications à des éléments structuraux  
sous chargements thermomécaniques cycliques
- ❑ Prise en compte de la température variable

## phénoménologie :



*effets du temps*

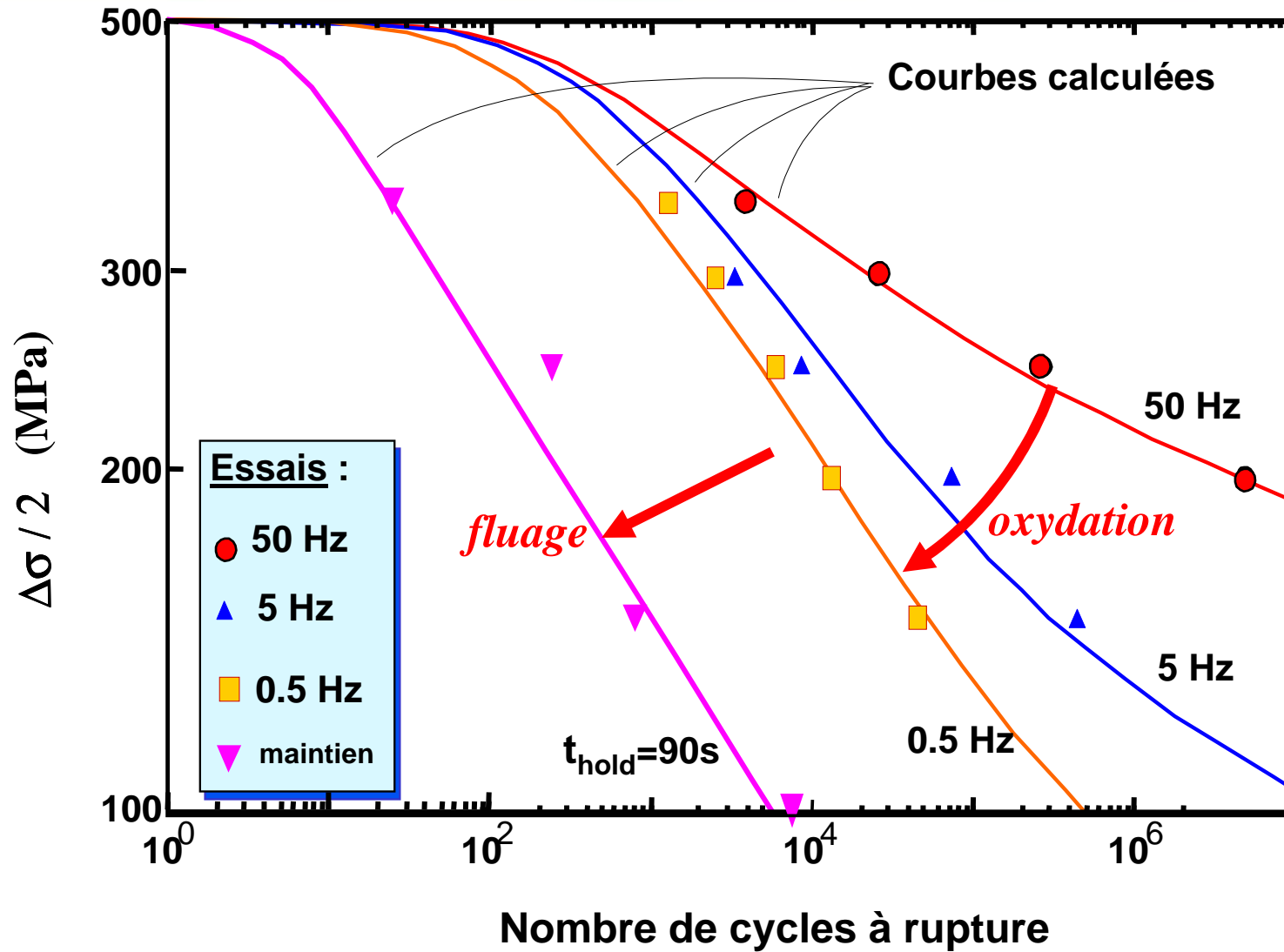
$$N_R = N_i + N_p$$



micro-initiation  
*interaction*  
*Fatigue-Oxydation*

micro-propagation  
*interaction*  
*Fatigue-Fluage*

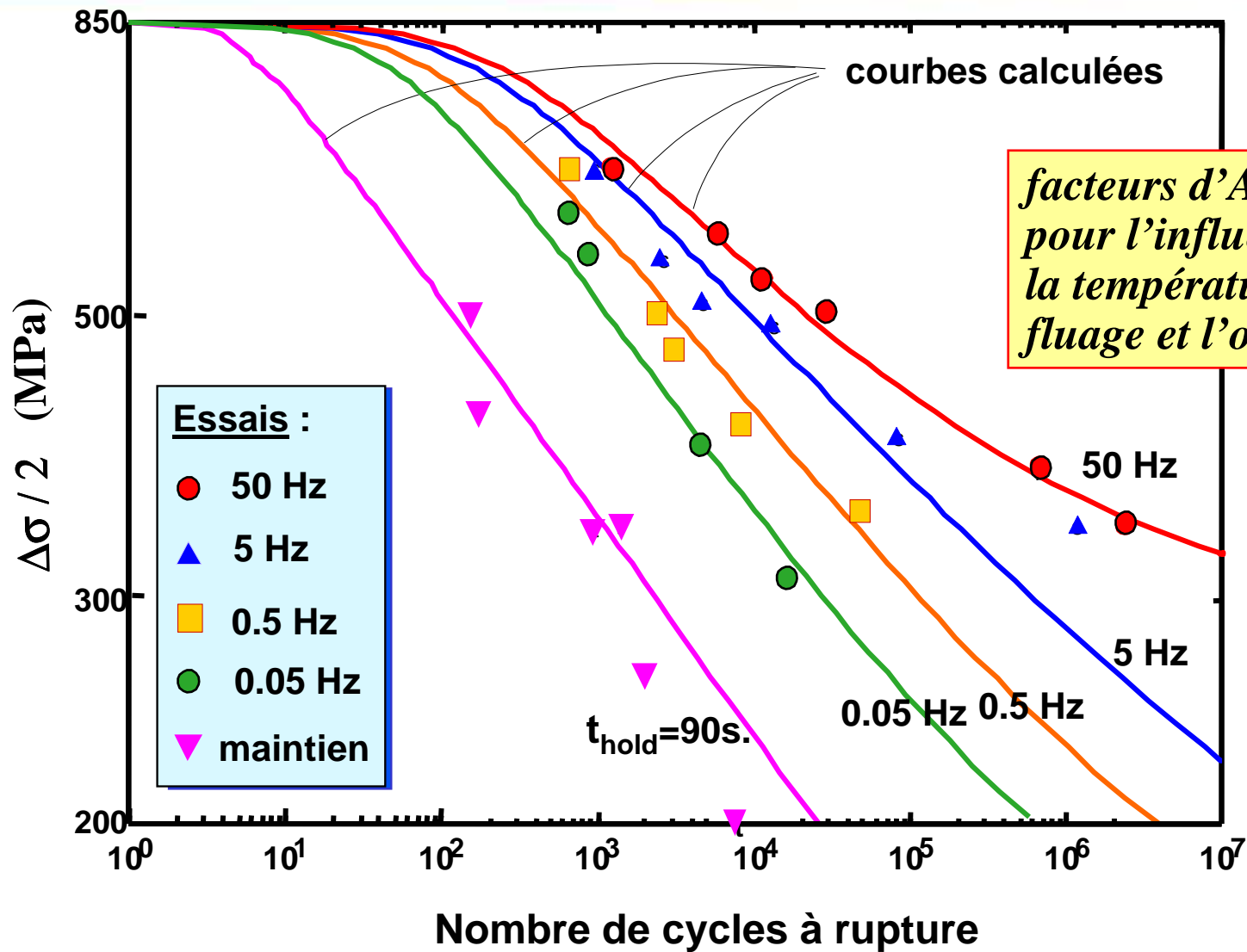
**AM1 revêtu C1A**



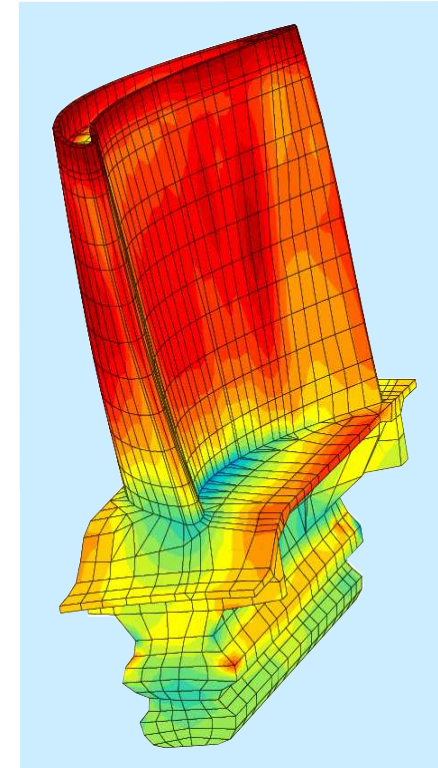
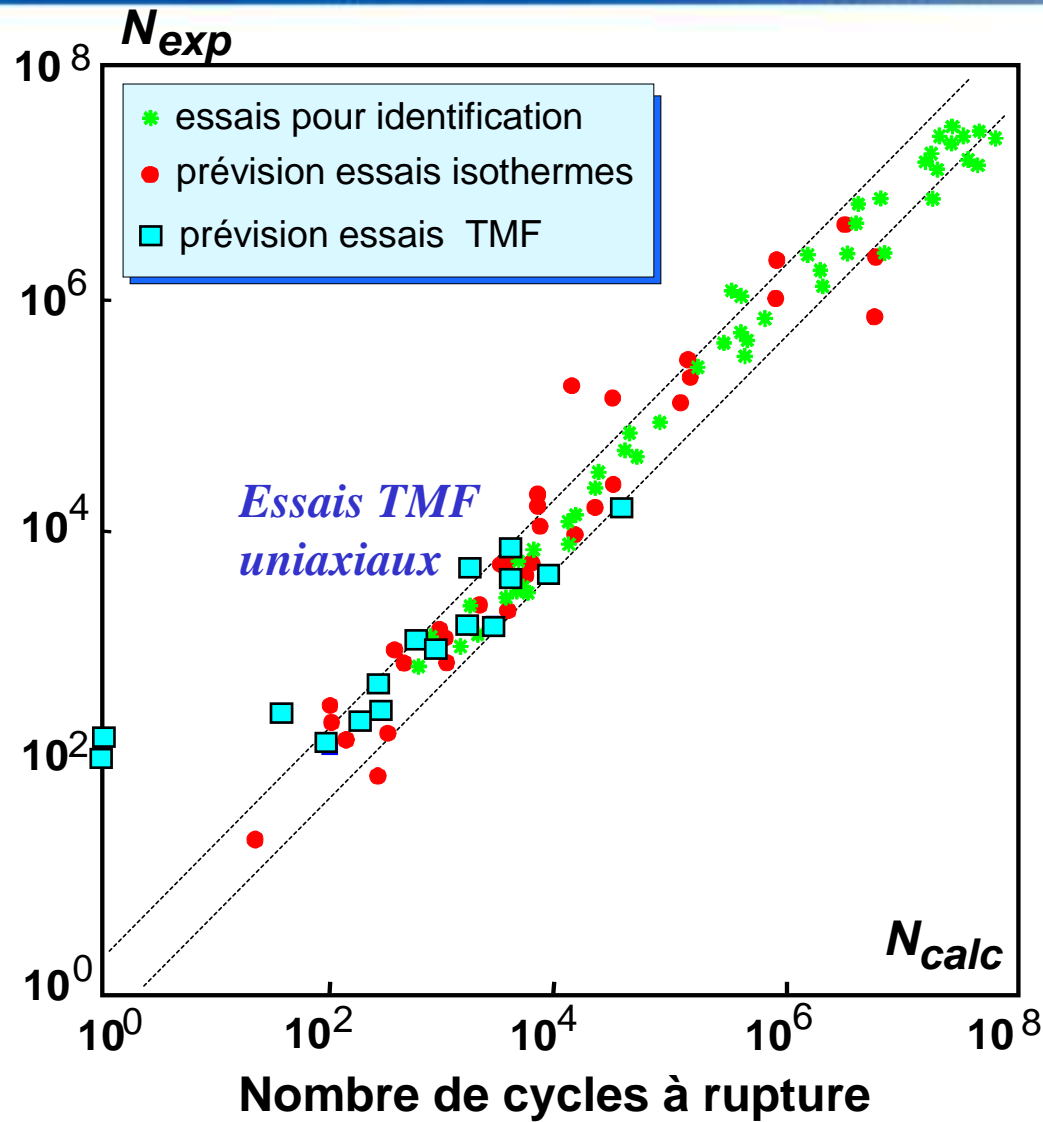


# FatOxFlu : AM1, 950°C, R = -1

prévisions



# FatOxFlu : monocristal AM1, validation globale



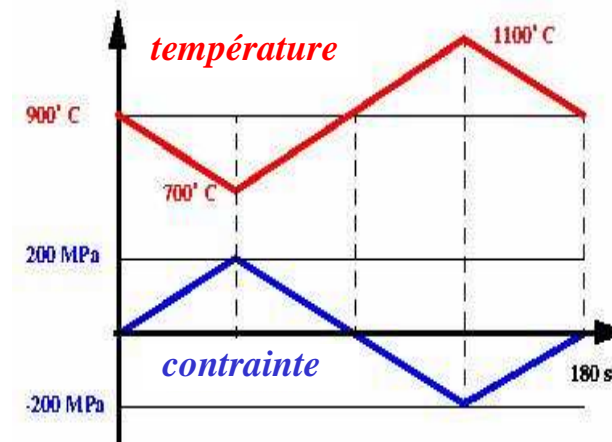
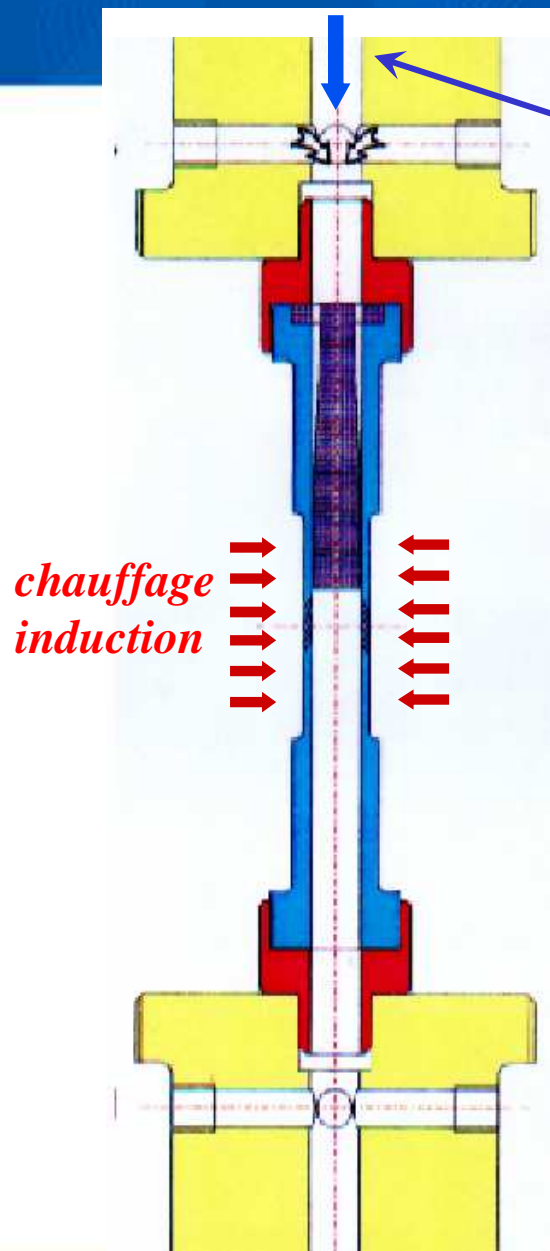
Essais par Snecma,  
Onera,  
ENSMP,  
ENSMA Poitiers,  
CEAT



# Plan de l'exposé

- ❑ Loi de comportement
- ❑ Modèle de fatigue pure à cumul non linéaire
- ❑ Modèle d'interaction Fatigue-Fluage
- ❑ Modèle d'interaction Fatigue-Oxydation-Fluage
- ❑ **Applications à des éléments structuraux  
sous chargements thermomécaniques cycliques**
- ❑ Prise en compte de la température variable

# Essais de fatigue thermomécanique avec gradient de paroi



*Températures stationnaires :*

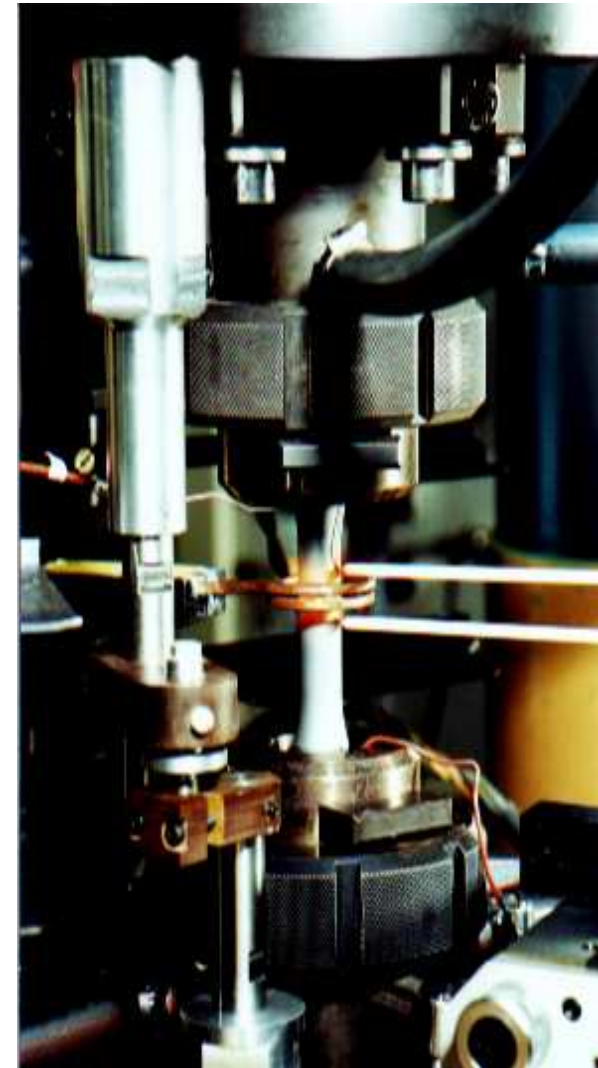
*paroi externe :*

$$T_{ext} = 1050^{\circ}\text{C}$$

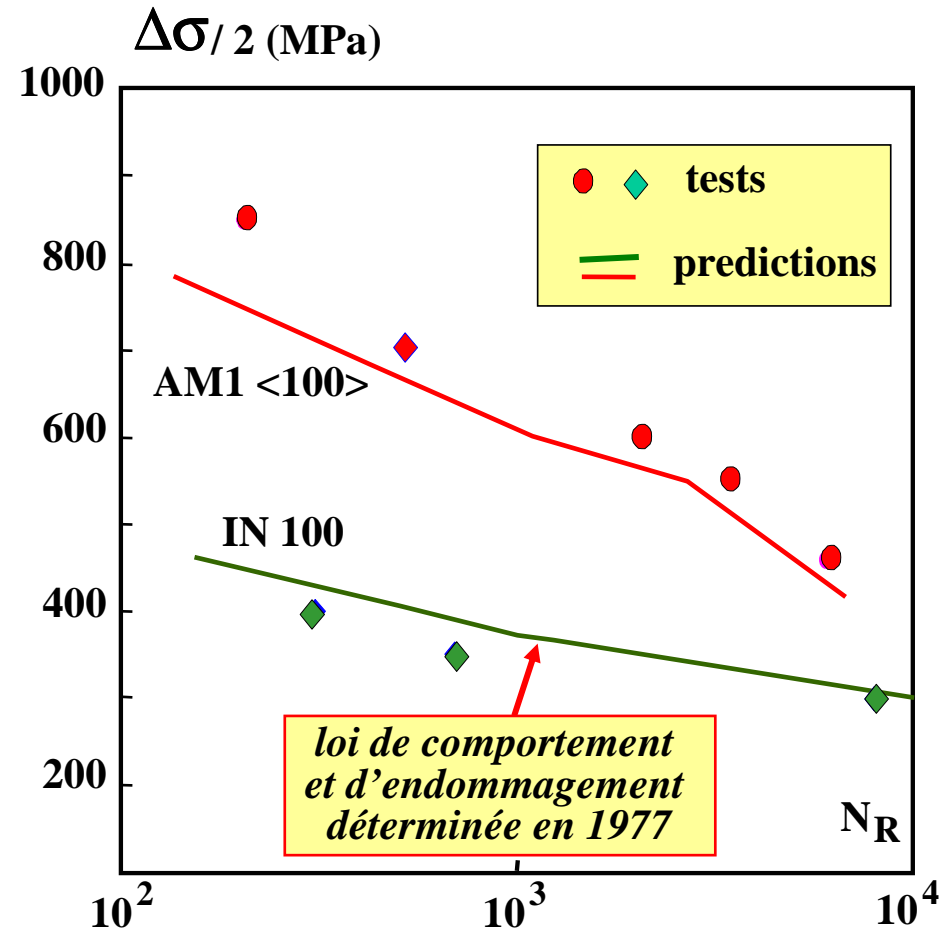
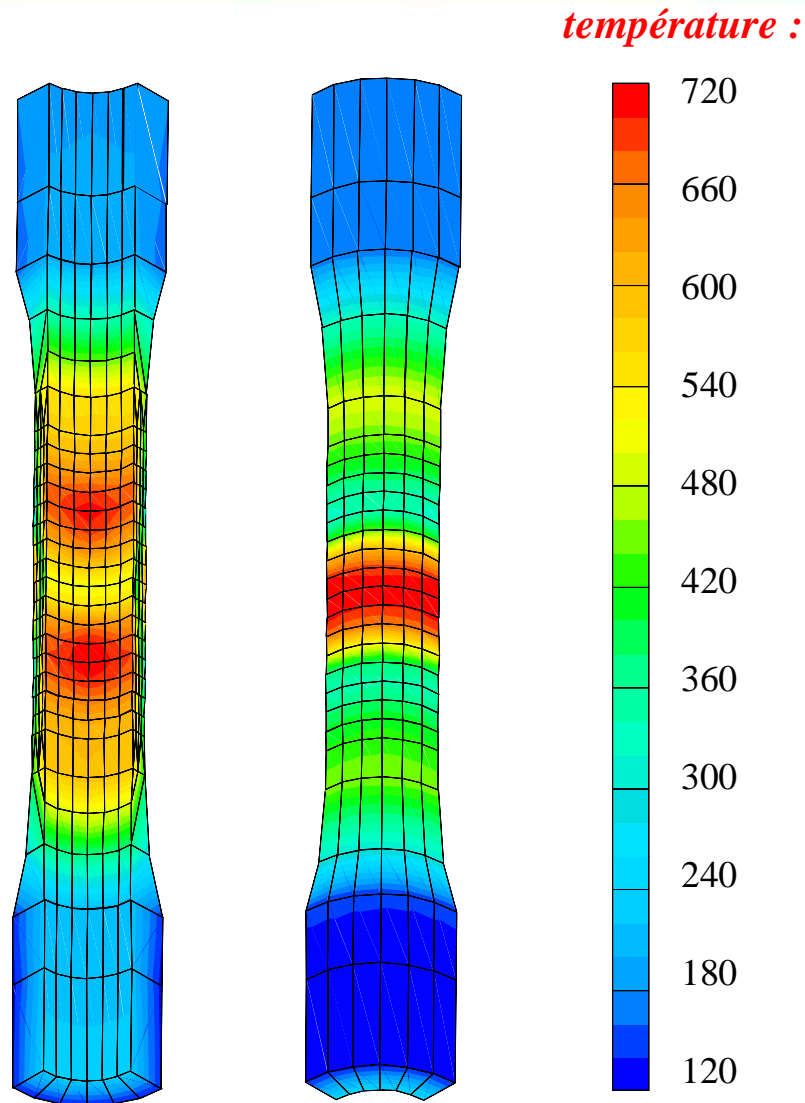
*paroi interne :*

$$T_{int} = 900^{\circ}\text{C}$$

*Pacou, Poirier, Nouailhas, 1997*

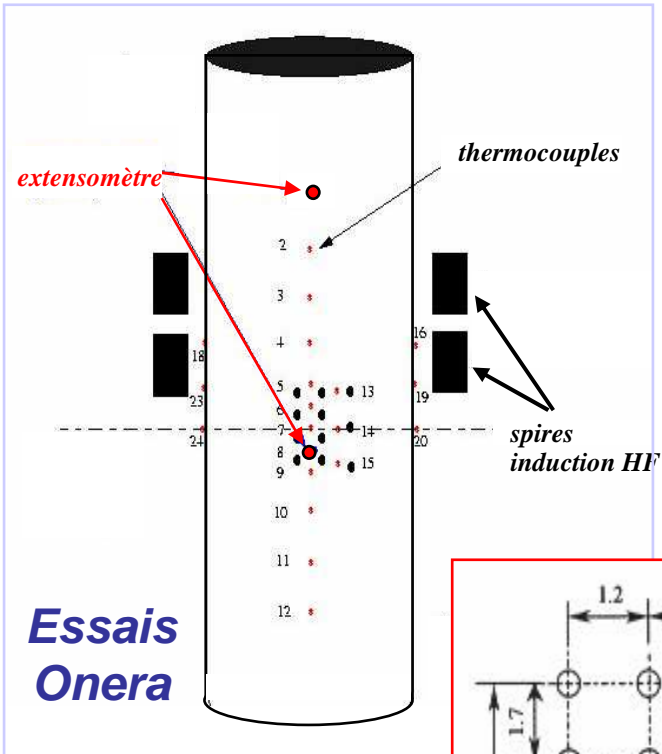


# Essais de fatigue thermomécanique avec gradient de paroi



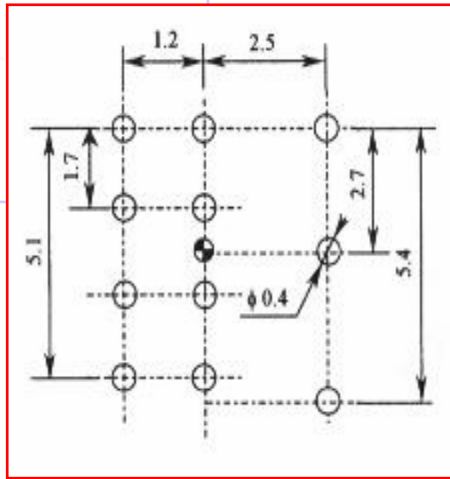
*Pacou, Poirier, Nouailhas, 1997*

# Essais de fatigue thermomécanique avec gradient de paroi et trous de refroidissement

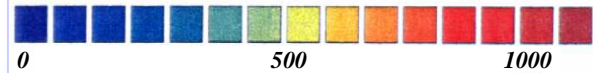
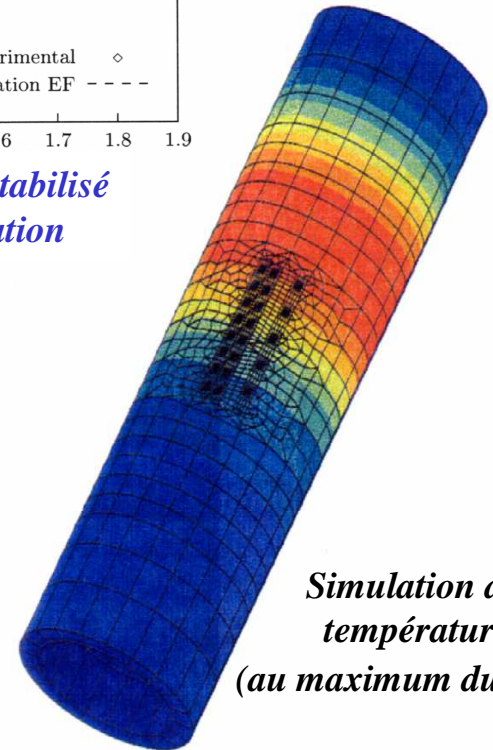
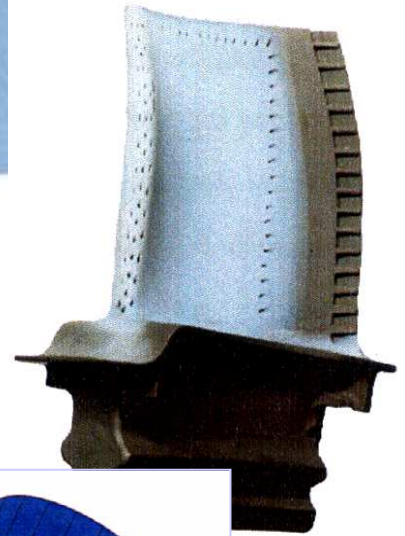
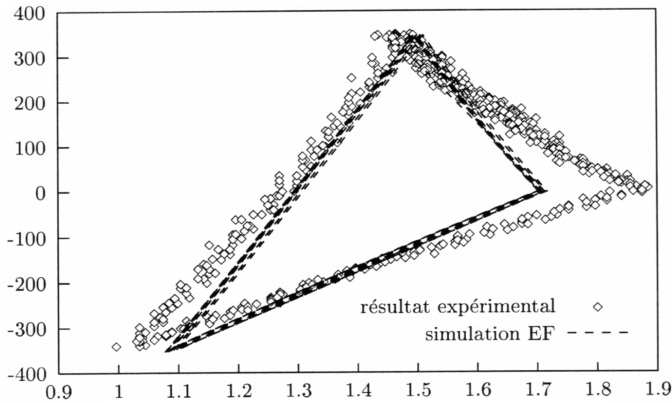


*Pacou, Poirier, 2001*

**Onze trous**

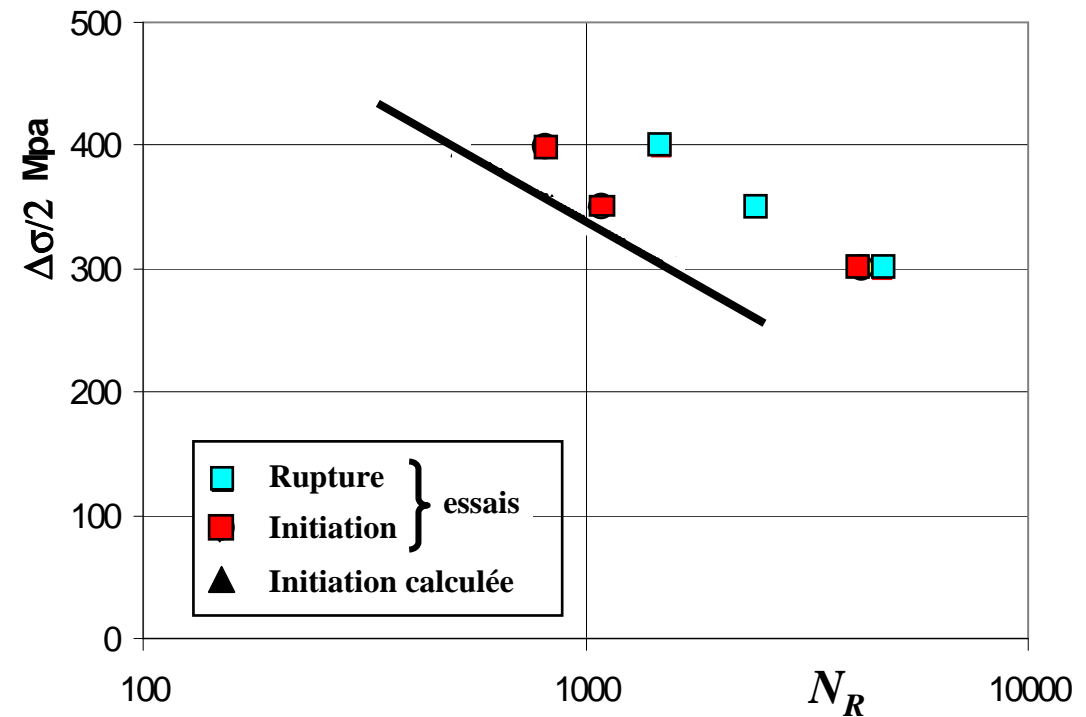
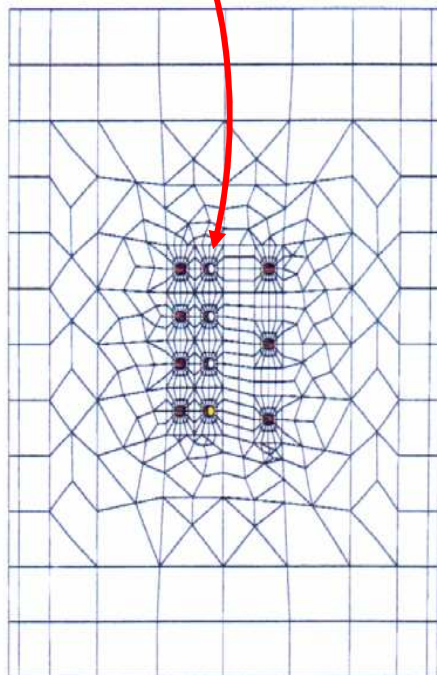
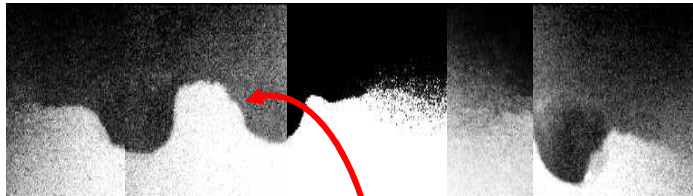


*Thèse J.-M. Cardona, ENSMP, 2002*





# Essais de fatigue thermomécanique avec gradient de paroi et trous de refroidissement

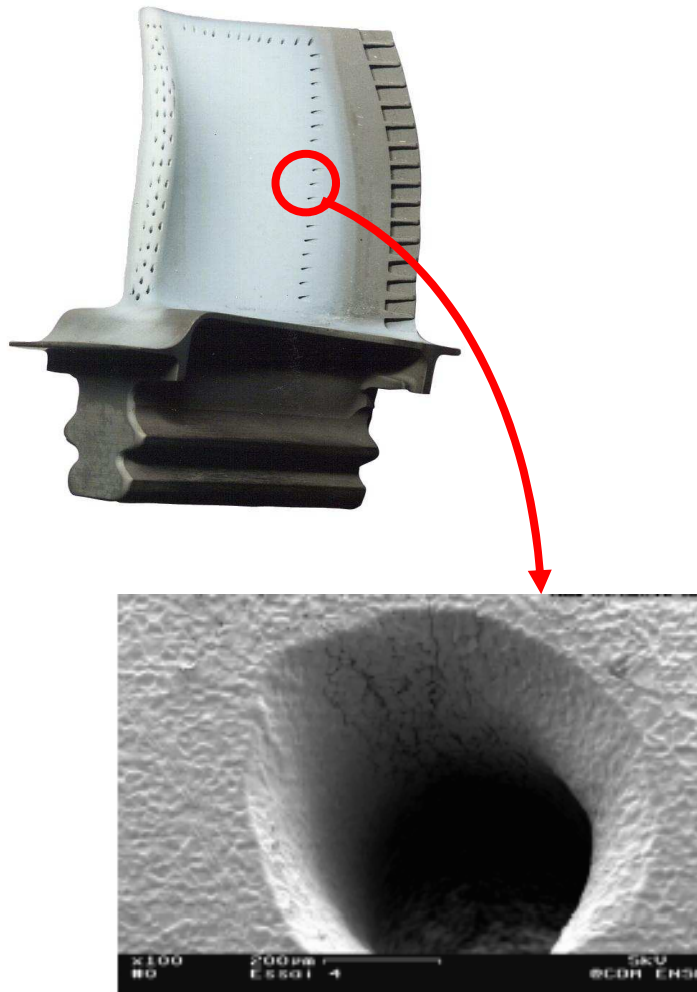


**effet du gradient local**

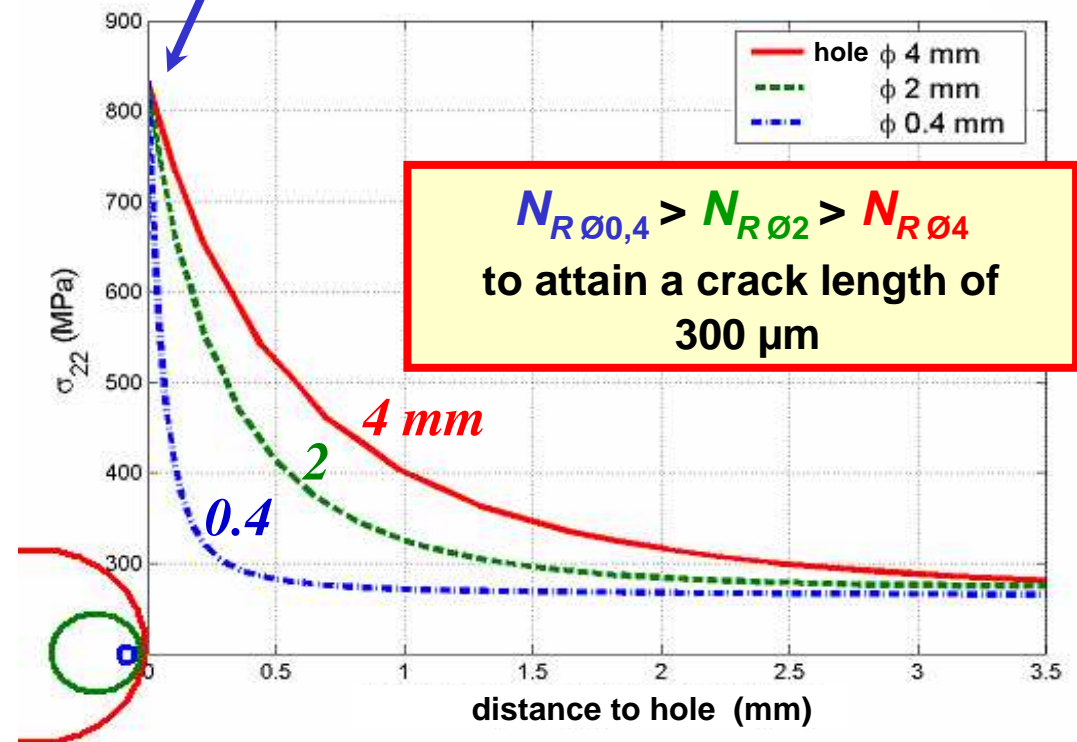
*Prévision de l'initiation à la position correcte (trou 2 à gauche)*

# Gradient effect for the crack initiation at hole

PhD Thesis Myriam KAMINSKI  
2007, Onera

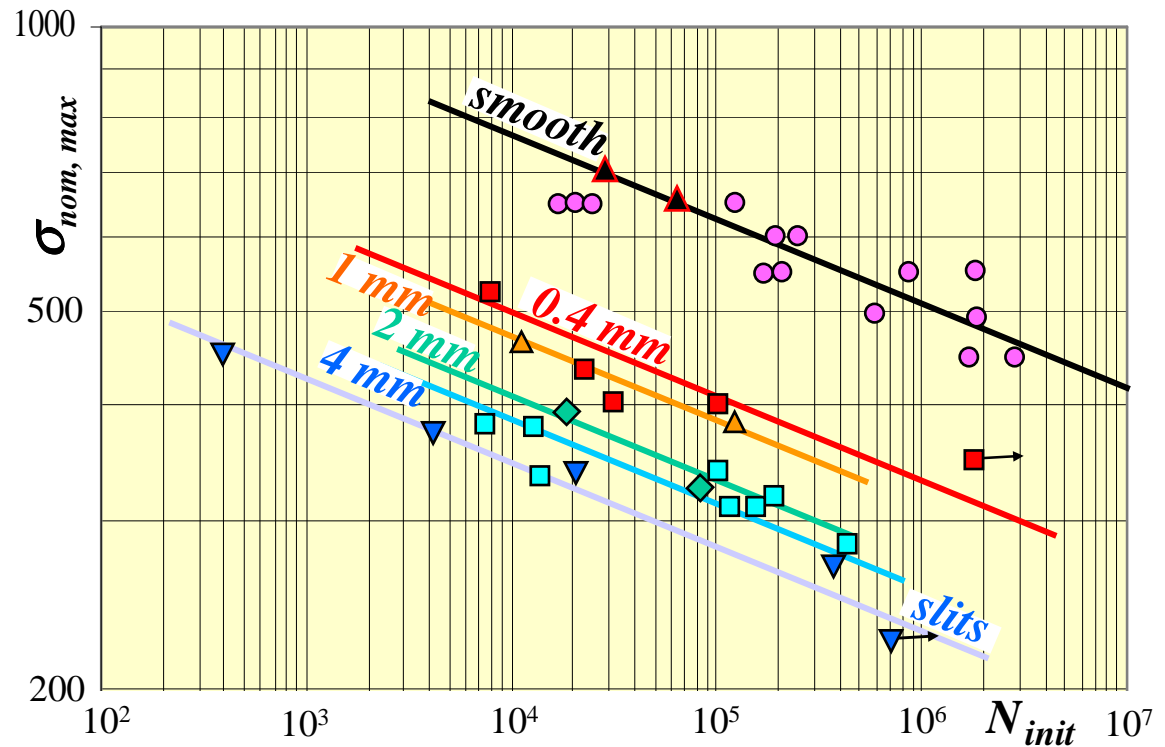
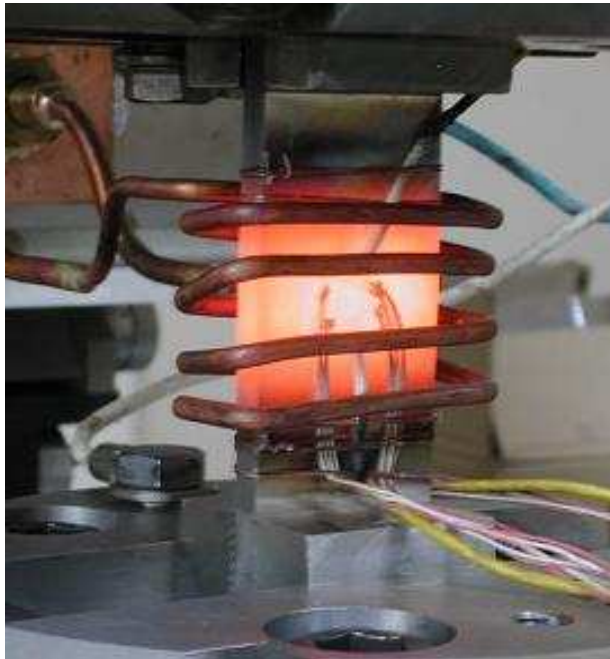


maximal stress for crack initiation analysis



$\Phi = 4, 2, 1, 0.4$  mm and slits

$R = 0.1 - 5$  Hz



## 3 combined effects :

- *gradient effect*
- *scale effect (porosities)*
- *multiaxiality effect (thickness)*

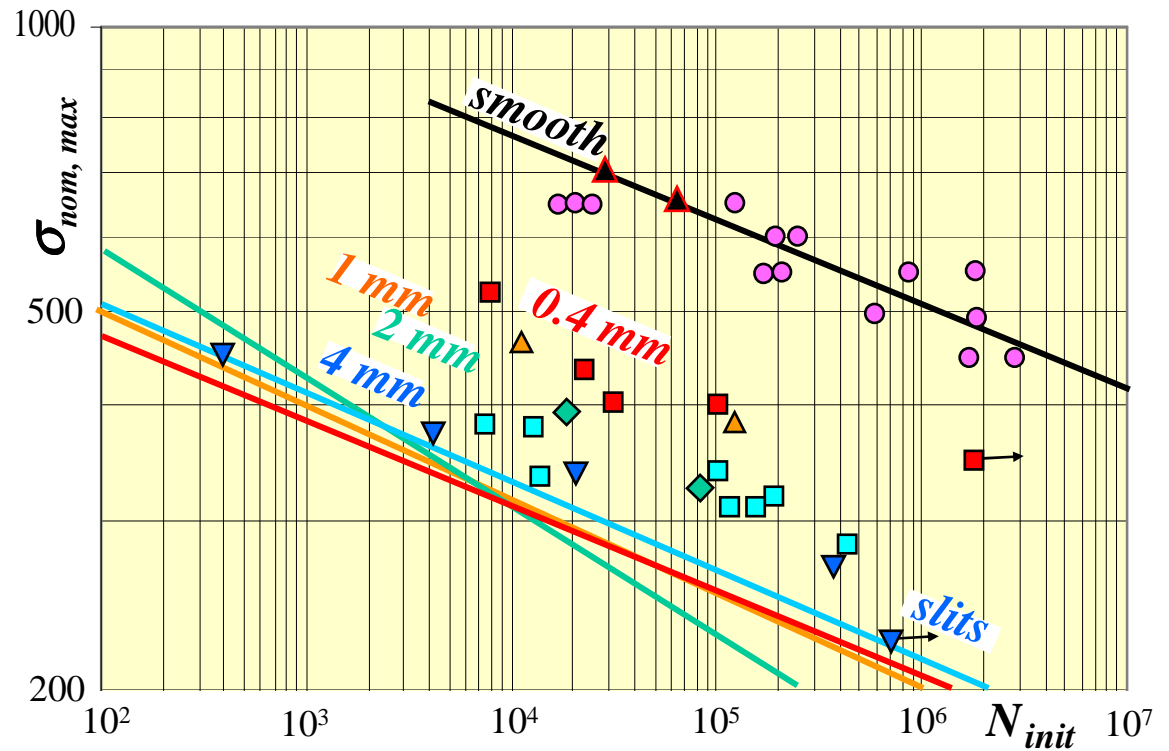


# Plate with holes of various sizes

AM1 – 950°C

$\Phi = 4, 2, 1, 0.4$  mm and slits

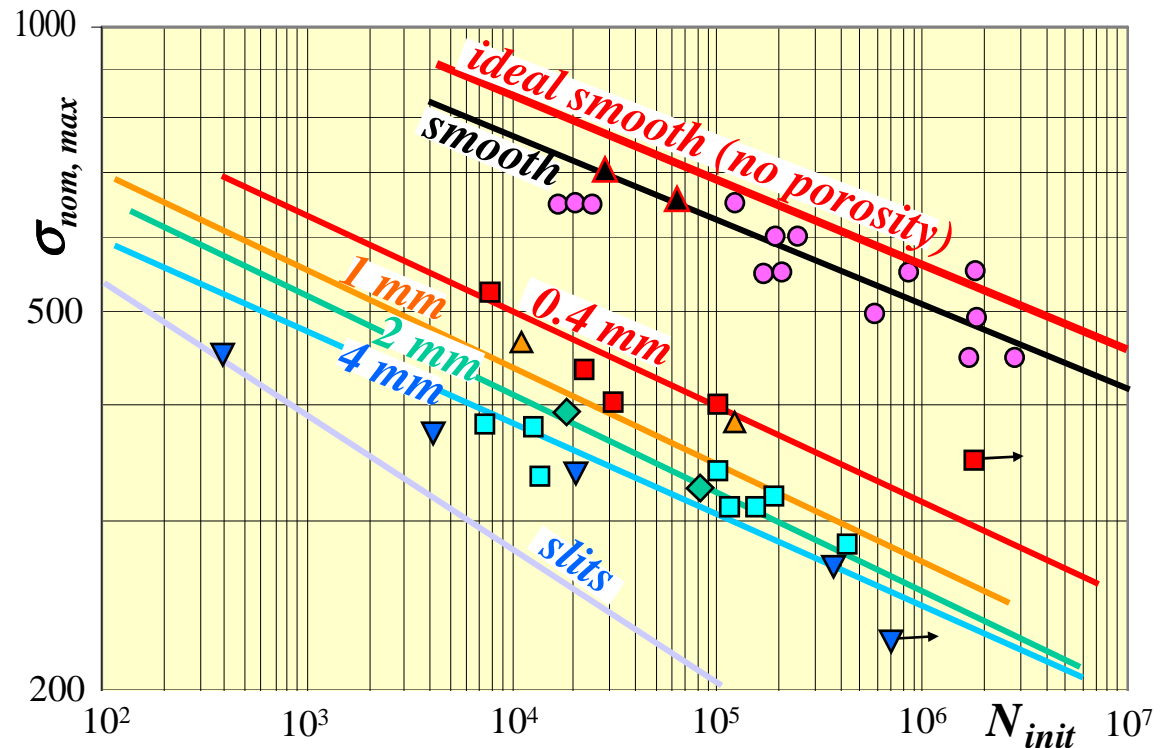
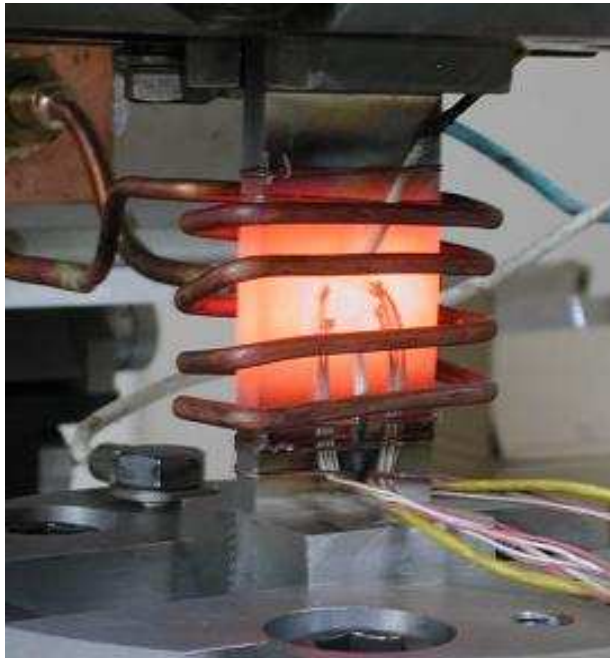
$R = 0.1 - 5$  Hz



**Model predictions – local maximum**

$\Phi = 4, 2, 1, 0.4 \text{ mm}$  and slits

$R = 0.1 - 5 \text{ Hz}$



**Model predictions – local average :**

$$\phi(x) = \exp\left(-\left(\frac{x}{d}\right)^2\right) \quad \Omega(x) = \int_V \phi(x - \xi) d\xi$$

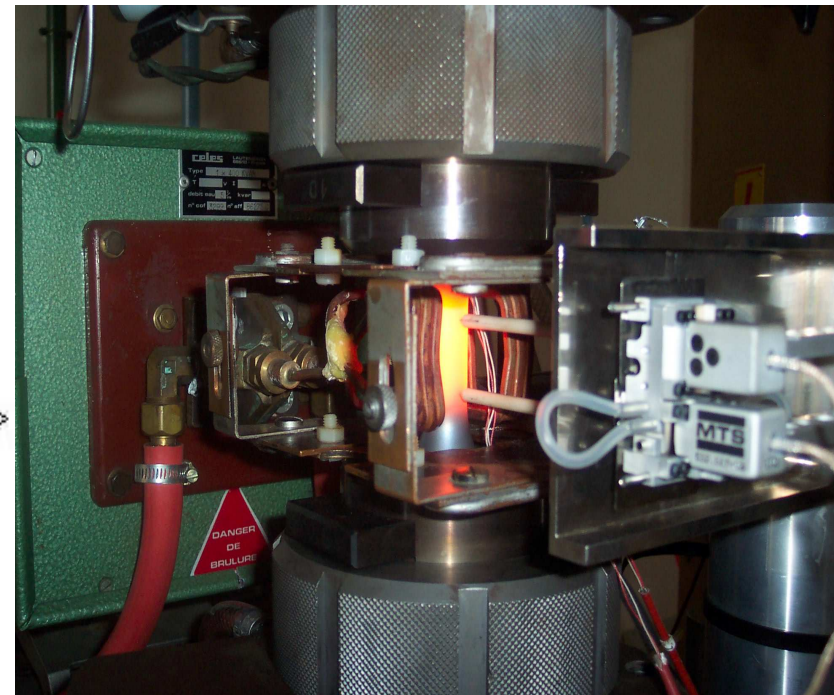
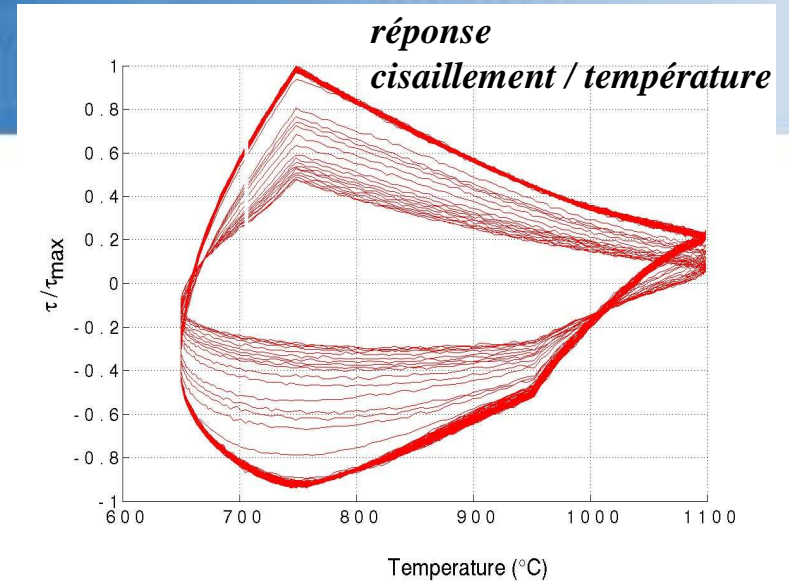
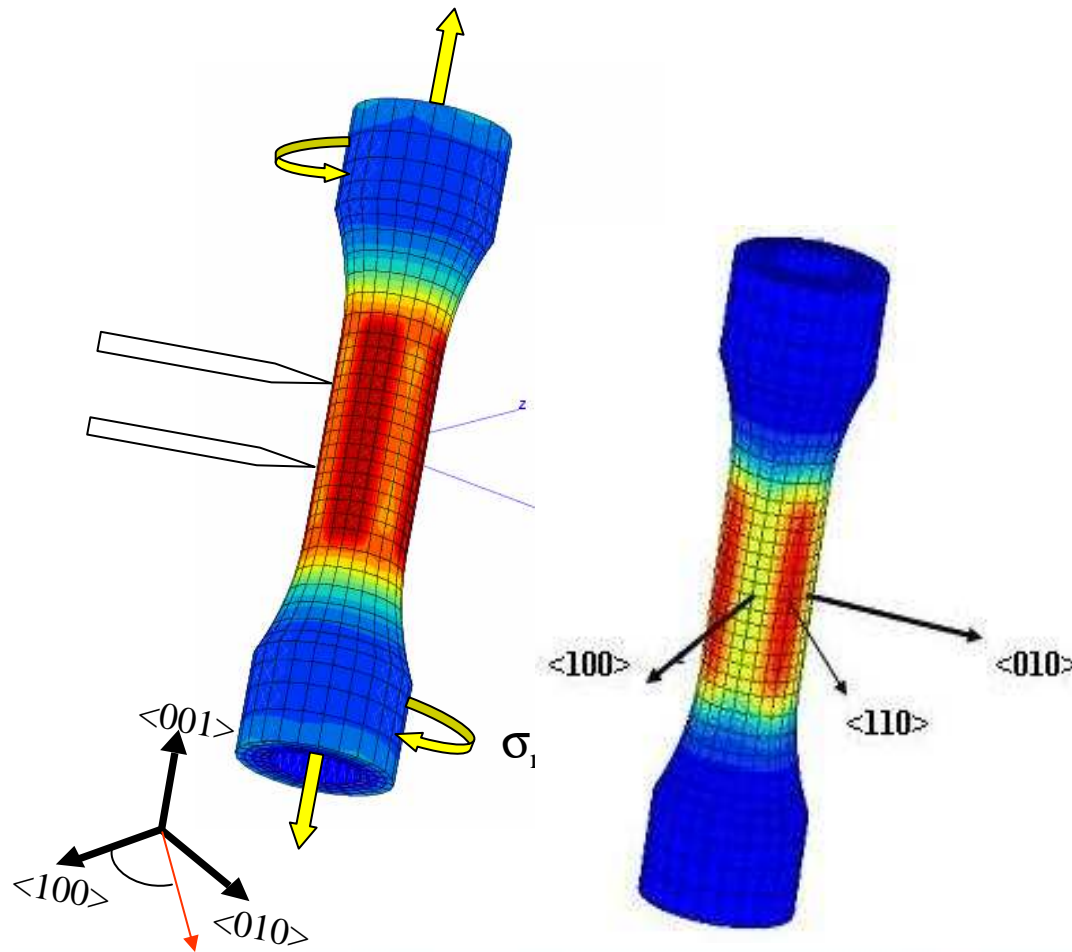
$$D(x) = \frac{1}{\Omega(x)} \int_V \phi(x - \xi) D(\xi) d\xi$$

$$d = 120 \mu\text{m}$$

# Fatigue thermomécanique multiaxiale de l'AM1

Ph.D. V. Bonnard, 2006

*traction-torsion sur tubes*

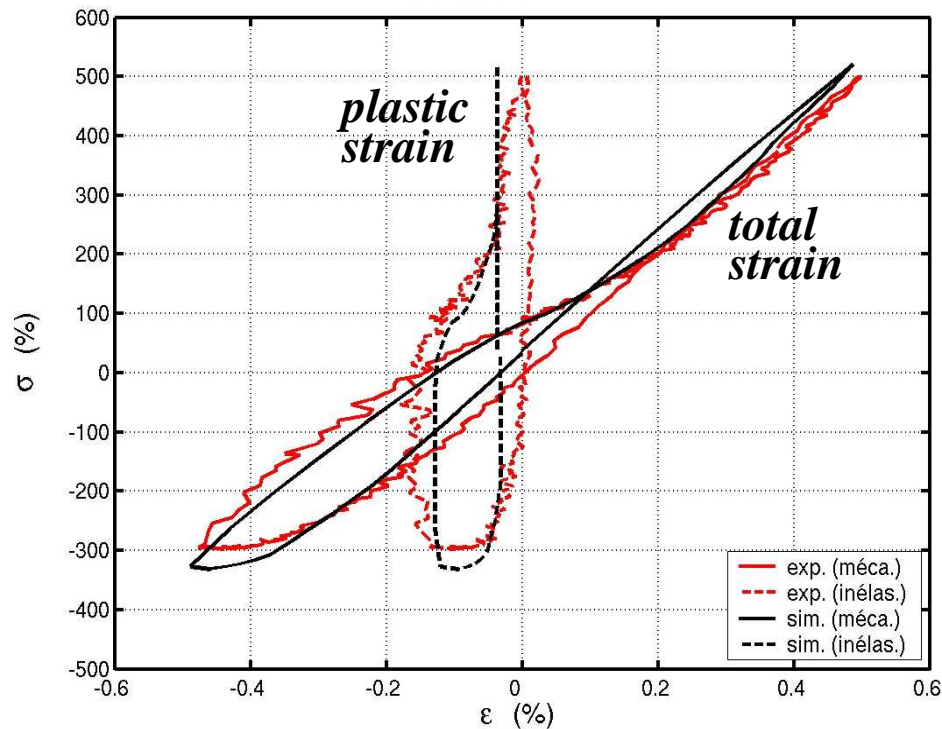




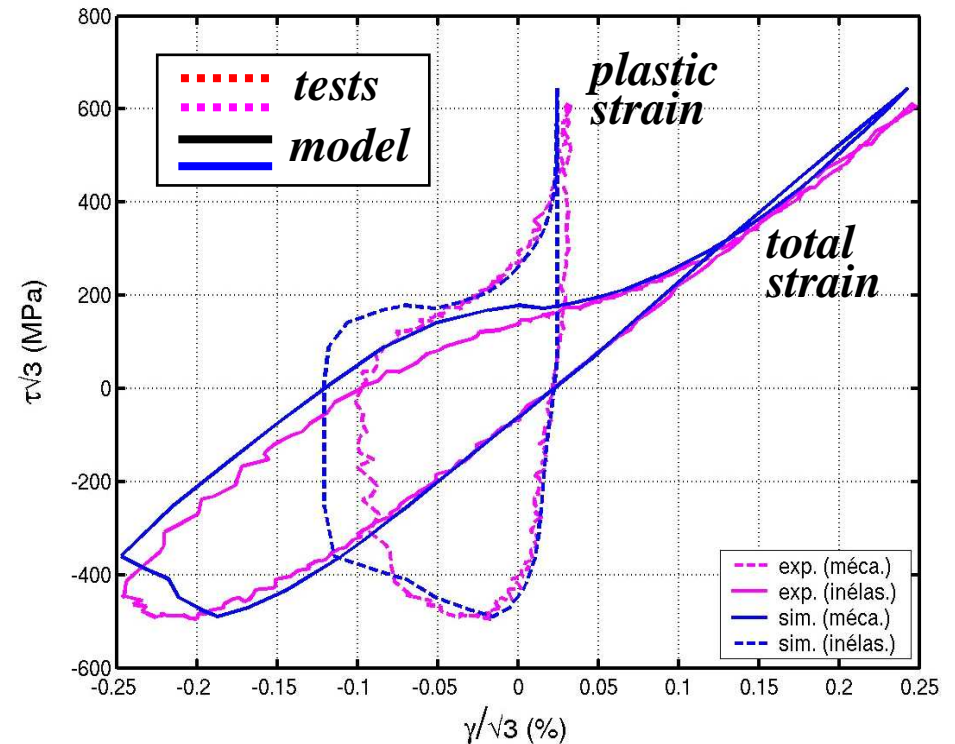
# Fatigue thermomécanique multiaxiale de l'AM1

*validation du modèle de viscoplasticité cristalline de l'Ecole des Mines*

essai de traction/torsion :  $\Delta\varepsilon_m/2=0,49\%$  -  $\Delta\gamma/2=0,425\%$



*traction-compression*



*torsion*

*cycle stabilisé: contraintes-déformations globales (moyennes)*

# Plan de l'exposé

- ❑ Loi de comportement
  - ❑ Modèle de fatigue pure à cumul non linéaire
  - ❑ Modèle d'interaction Fatigue-Fluage
  - ❑ Modèle d'interaction Fatigue-Oxydation-Fluage
  - ❑ Applications à des éléments structuraux  
sous chargements thermomécaniques cycliques
- ❑ **Prise en compte de la température variable**

# Applications à température variable et missions complexes

*Interpolation des coefficients en fonction de la température*

*Température variable – missions complexes :*

Fluage : *pas de problème, il suffit d'intégrer*

Fatigue : *modèle non incrémental, "en cycles"*



❑ *Technique de sélection des cycles : Rain Flow (multiaxial)*

❑ *Prise en compte de la température variable*

*Normalisation*

*Méthode de type Taira*

❑ *Cycles complexes non proportionnels*

*Prise en compte des effets de déphasage*

*Forme "incrémentale simplifiée"*

# Démarche basée sur la définition d'une température effective

1. *Normalisation, sans imposer des exposants identiques* :  $\underline{S}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma^*(T(t))}$

2. *Technique du Rain-Flow*      sélection des cycles :  $\{t_i\}_{i=1,n}$

3. *Définition de l'amplitudes et de la valeur moyenne de  $\underline{S}(t)$*

amplitude :  $S_{a_{eq}}$  }  
« centre » associé :  $\underline{\bar{S}}$  } → méthode du « range »  
amplitude effective :  $S_{a_{eff}}$

4. *Définition de la température effective  $T^*$*

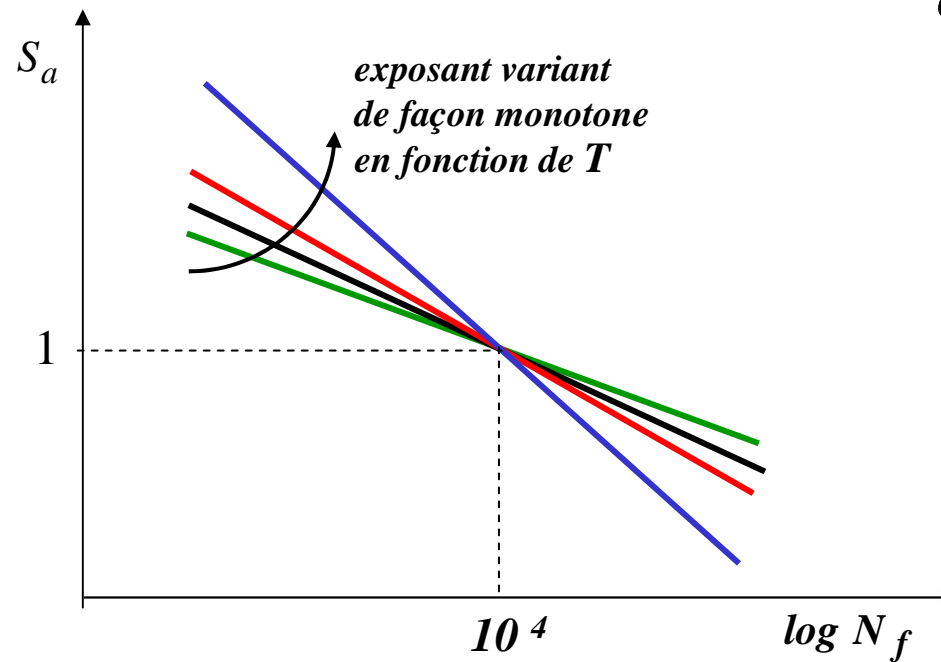
5. *Définition de l'amplitude effective pour chargement non proportionnel*

6. *Utilisation dans la loi d'endommagement à cumul linéaire ou non linéaire*



# Démarche basée sur la définition d'une température effective

1. Normalisation, sans imposer des exposants identiques :  $\underline{S}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma^*(T(t))}$

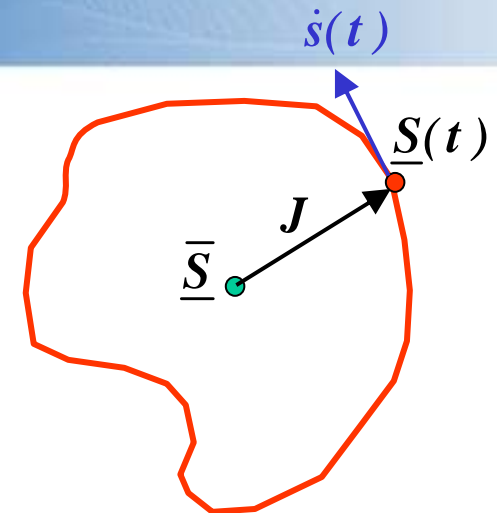


# Définition de la température effective $T^*$

*Simplification du cumul linéaire sur cette étape*

*Illustré sur le cas d'une loi puissance à seuil :*

$$\frac{1}{N_f} = \left\langle \frac{S_{a_{eff}} - S_D(T)}{B^*(T)} \right\rangle^{\beta(T)}$$



*En isotherme, proportionnel, cette loi en cycles peut résulter de l'intégration de :*

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\beta(T(t))}{4B^*(T(t))} \left\langle \frac{J(\underline{S}(t) - \bar{S}) - S_D(T(t))}{B^*(T(t))} \right\rangle^{\beta(T(t))-1} \dot{s}(t)$$

avec :

$$\dot{s}(t) = J(\dot{\underline{S}}(t)) = \sqrt{\frac{3}{2} \dot{\underline{S}}'(t) : \dot{\underline{S}}'(t)}$$

*déviateur de  $\underline{\dot{S}}$*

*forme incrémentale qui servira aussi pour le chargement non proportionnel*

# Cas du chargement anisotherme proportionnel

*Intégration numérique sur le cycle :*

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{N_f^*} = \int_{\text{cycle}} \frac{\beta(T(t))}{4B^*(T(t))} \left\langle \frac{J(\underline{S}(t) - \bar{S}) - S_D(T(t))}{B^*(T(t))} \right\rangle^{\beta(T(t))-1} \dot{s}(t) dt$$

*Intégration analytique avec  $T = T^* = Cte$  :*

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{N_f(T^*)} = \left\langle \frac{S_{a_{eff}} - S_D(T^*)}{B^*(T^*)} \right\rangle^{\beta(T^*)}$$

*Identification :*

**donne  $T^*$**

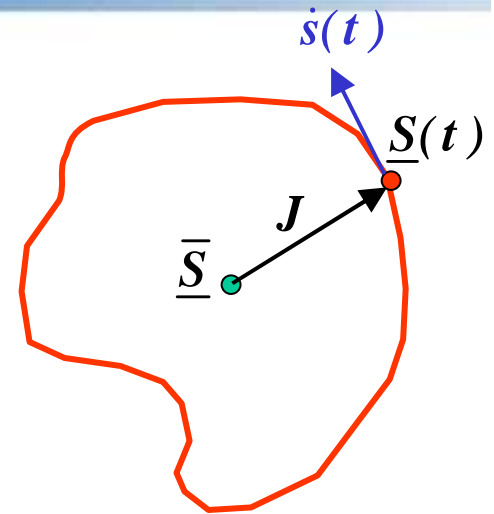
*équation non linéaire à une inconnue :*

- Newton
- point fixe

# Cas du chargement isotherme non proportionnel

Intégration numérique sur le cycle :

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{N_f^*} = \int_{\text{cycle}} \frac{\beta}{4 B^*} \left\langle \frac{J(\underline{S}(t) - \bar{S}) - S_D}{B^*} \right\rangle^{\beta-1} \dot{s}(t) dt$$



Intégration analytique en uniaxial proportionnel :

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{N_f(S_{a_{eff}}^*)} = \left\langle \frac{S_{a_{eff}}^* - S_D}{B^*} \right\rangle^{\beta}$$

Identification : **donne  $S_{a_{eff}}^*$  :**

$$S_{a_{eff}}^* - S_D = \left( \frac{\beta}{4} \int_{\text{cycle}} \left\langle J(\underline{S}(t) - \bar{S}) - S_D \right\rangle^{\beta-1} \dot{s}(t) dt \right)^{1/\beta}$$

# Cas du chargement anisotherme non proportionnel

*Intégration numérique sur le cycle :*

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{N_f^*(\underline{S}(t))} = \int_{\text{cycle}} \frac{\beta(T(t))}{4B^*(T(t))} \left\langle \frac{J(\underline{S}(t) - \bar{S}) - S_D(T(t))}{B^*(T(t))} \right\rangle^{\beta(T(t))-1} \dot{s}(t) dt$$

*Intégration avec  $T = T^* = \text{Cte}$  : chargement linéaire par morceaux*

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{N_f(\underline{S}(t), T^*)}$$

+  
*petite approximation*

$$= \frac{1}{4} \sum_i \frac{J(\underline{S}_{i+1} - \underline{S}_{i+1})}{J_{i+1} - J_i} \left[ \left\langle \frac{J_{i+1} - S_D(T^*)}{B^*(T^*)} \right\rangle^{\beta(T^*)} - \left\langle \frac{J_i - S_D(T^*)}{B^*(T^*)} \right\rangle^{\beta(T^*)} \right]$$

*Identification :*

**donne  $T^*$**

*équation non linéaire à une inconnue :*

- Newton
- point fixe

$S_{a_{eff}}^*$  obtenu ensuite comme dans le cas isotherme



# Amplitude effective avec chargement non proportionnel

$$S_{a_{eff}}^* - S_D = \left( \frac{\beta}{4} \int_{cycle} \langle J(\underline{S}(t) - \bar{S}) - S_D \rangle^{\beta-1} \dot{s}(t) dt \right)^{1/\beta}$$

**Cas particulier de la traction-torsion déphasée de 90° :**

avec  $S_D = 0$

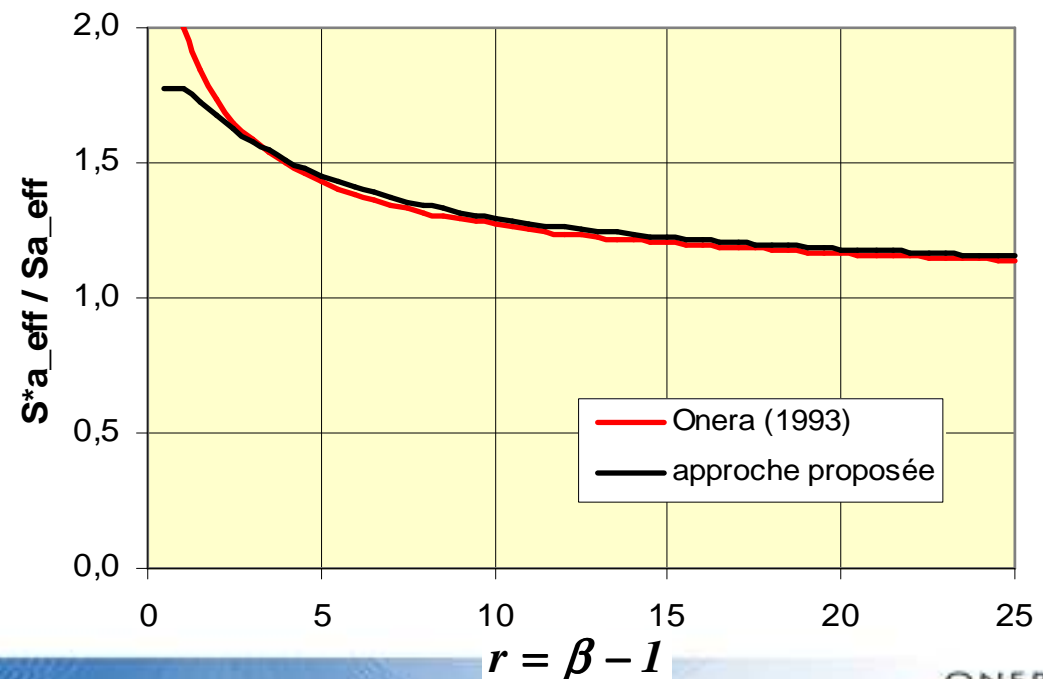
$$S_{a_{eff}}^* = S_{a_{eff}} \left( \frac{\pi}{2} \beta \right)^{1/\beta}$$

$\beta$  paramètre  
fixé

**Modèle Onera (1993) :**

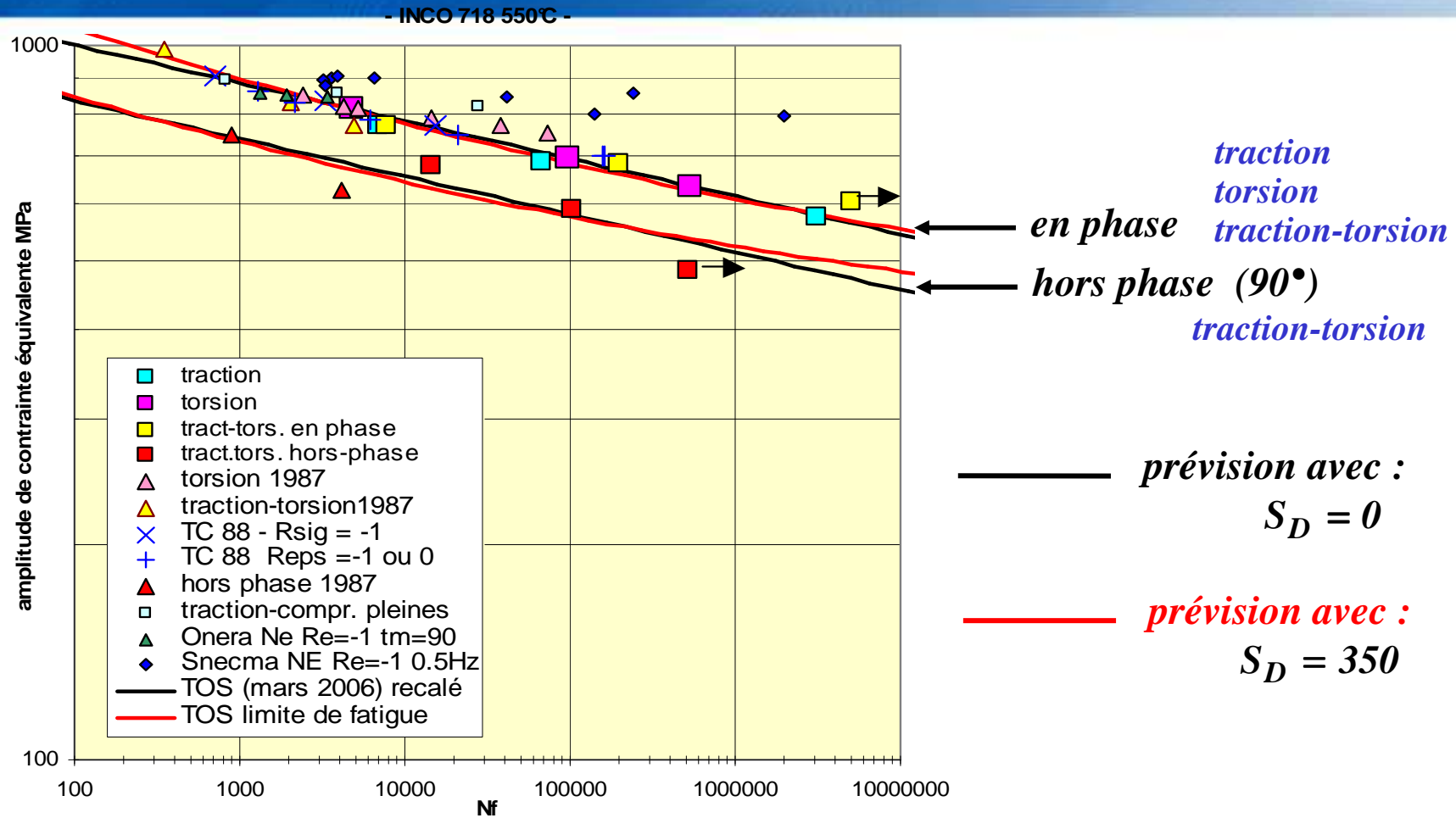
$$S_{a_{eff}}^* = S_{a_{eff}} (r + 1)^{1/r}$$

$r$  paramètre  
ajustable



# Application à l'INCO 718 à 550°C

essais Onera 1987  
essais Onera 2005



$$S_{a_{eff}}^* - S_D = \left( \frac{\beta}{4} \int_{cycle} \langle J(\underline{S}(t) - \underline{\bar{S}}) - S_D \rangle^{\beta-1} \dot{s}(t) dt \right)^{1/\beta} = \left( \frac{\pi}{2} \beta \frac{S_{a_{eff}}}{S_{a_{eff}} - S_D} \right)^{1/\beta} (S_{a_{eff}} - S_D)$$



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB