



AREVA



***Comportement en fatigue oligocyclique des aciers
inoxydables austénitiques en milieu eau primaire REP***

***Low cycle fatigue behaviour of austenitic stainless
steels in Pressurized Water Reactor environment***

Jean Alain LE DUFF, André LEFRANCOIS

AREVA NP Engineering Division – Materials, Technology & Chemistry Department

Jean Philippe VERNOT, Dominique MARTIN

AREVA NP Technical Center - Fluids & Structural Mechanics Department

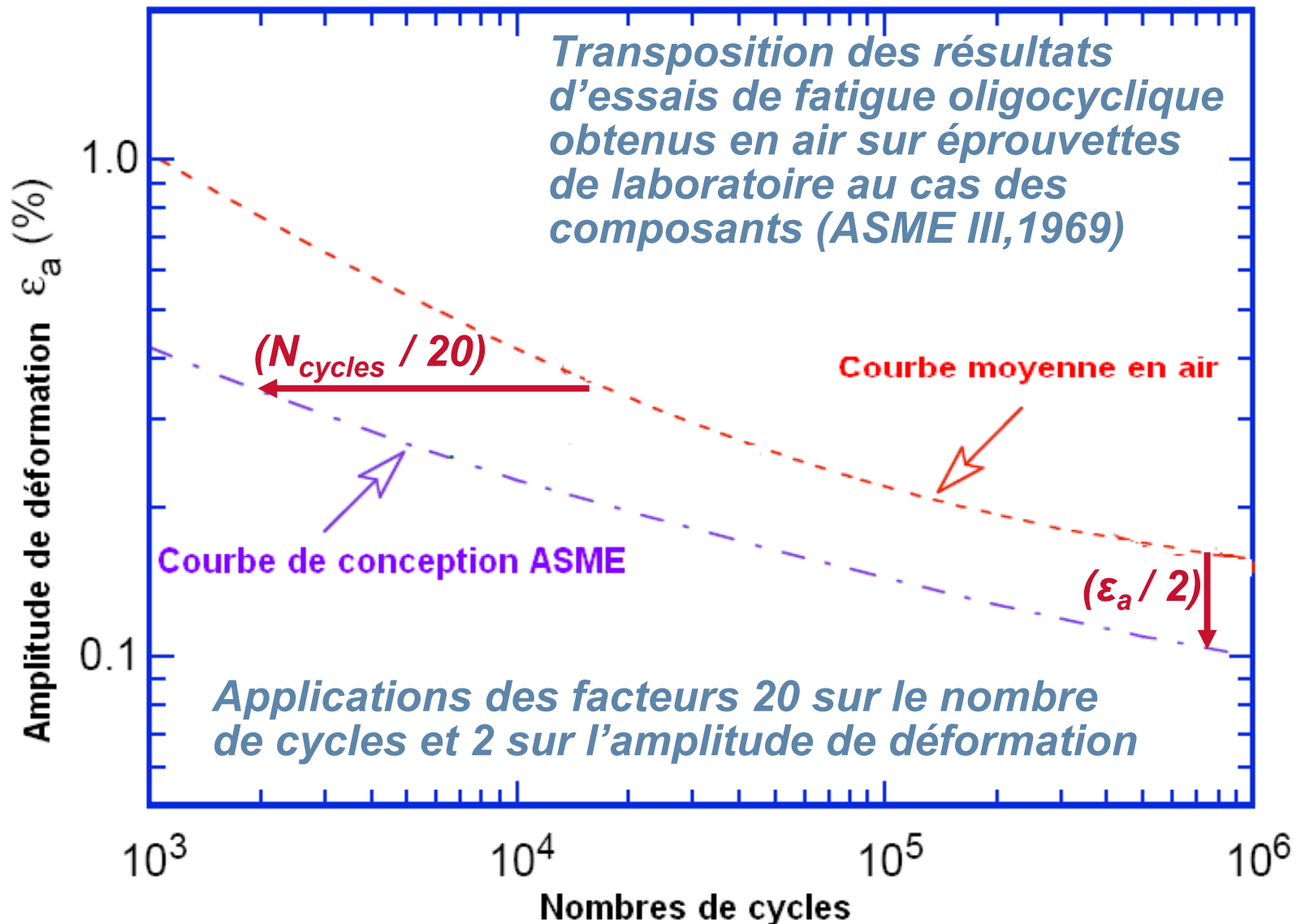
Olivier CALONNE

AREVA NP Technical Center - Corrosion Department

Rappel concernant les courbes de conception en fatigue des composants de réacteurs

- ▶ **La conception en fatigue d'un composant REP impose de vérifier l'absence d'amorçage de fissure pour 40 ans ou 60 ans,**
- ▶ **La démonstration est basée sur des calculs de facteurs d'usages (f.u. < 1) selon des méthodologies codifiées (ASME et RCC-M)**
- ▶ **Le nombre de transitoires acceptables pour un composant est obtenu en utilisant des courbes S – N de conception codifiées**
- ▶ **Origine des courbes de conception en fatigue codifiées:**
 - ◆ **Courbes S-N moyennes en air (criteria ASME III, 1969):**
 - Essais en air sur petites éprouvettes polies à déformation imposée
 - Courbes de fatigue moyennes établies en termes d'amplitudes de déformation « ϵ_a » en fonction de $N_R \rightarrow \epsilon_a = A N_R^{-0,5} + B$
 - ◆ **Facteurs 2 et 20 pour une transposition éprouvette / composant**
 - Facteur 20 sur N_R égal au produit de 3 sous facteurs:
 - Dispersion des données (écart maximum/moyenne) \rightarrow 2.0
 - Effet d'échelle entre éprouvette et composant \rightarrow 2.5
 - Effets d'état de surface, d'atmosphère, etc. \rightarrow 4.0

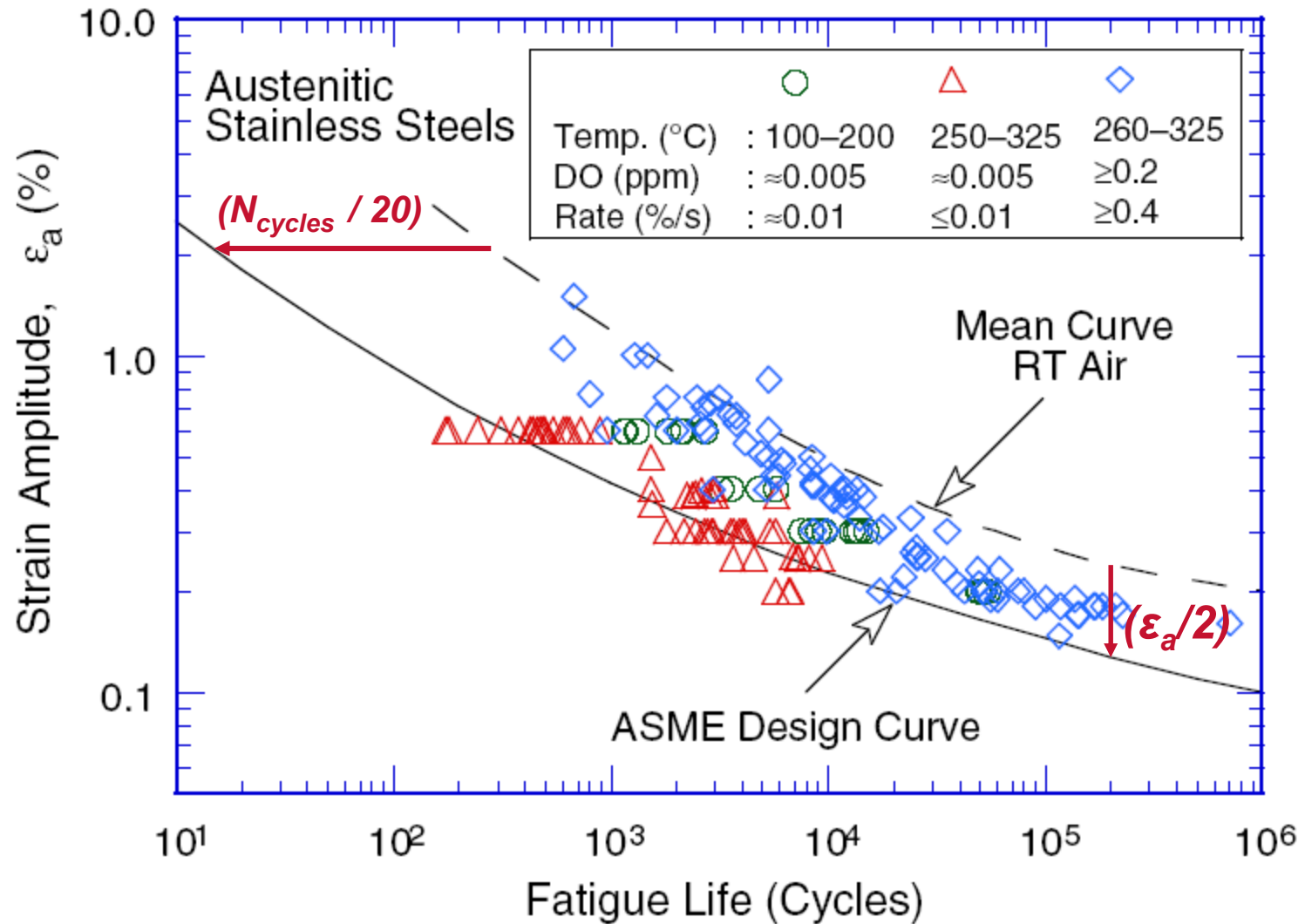
Courbe de conception en fatigue des composants en acier inoxydable austénitique



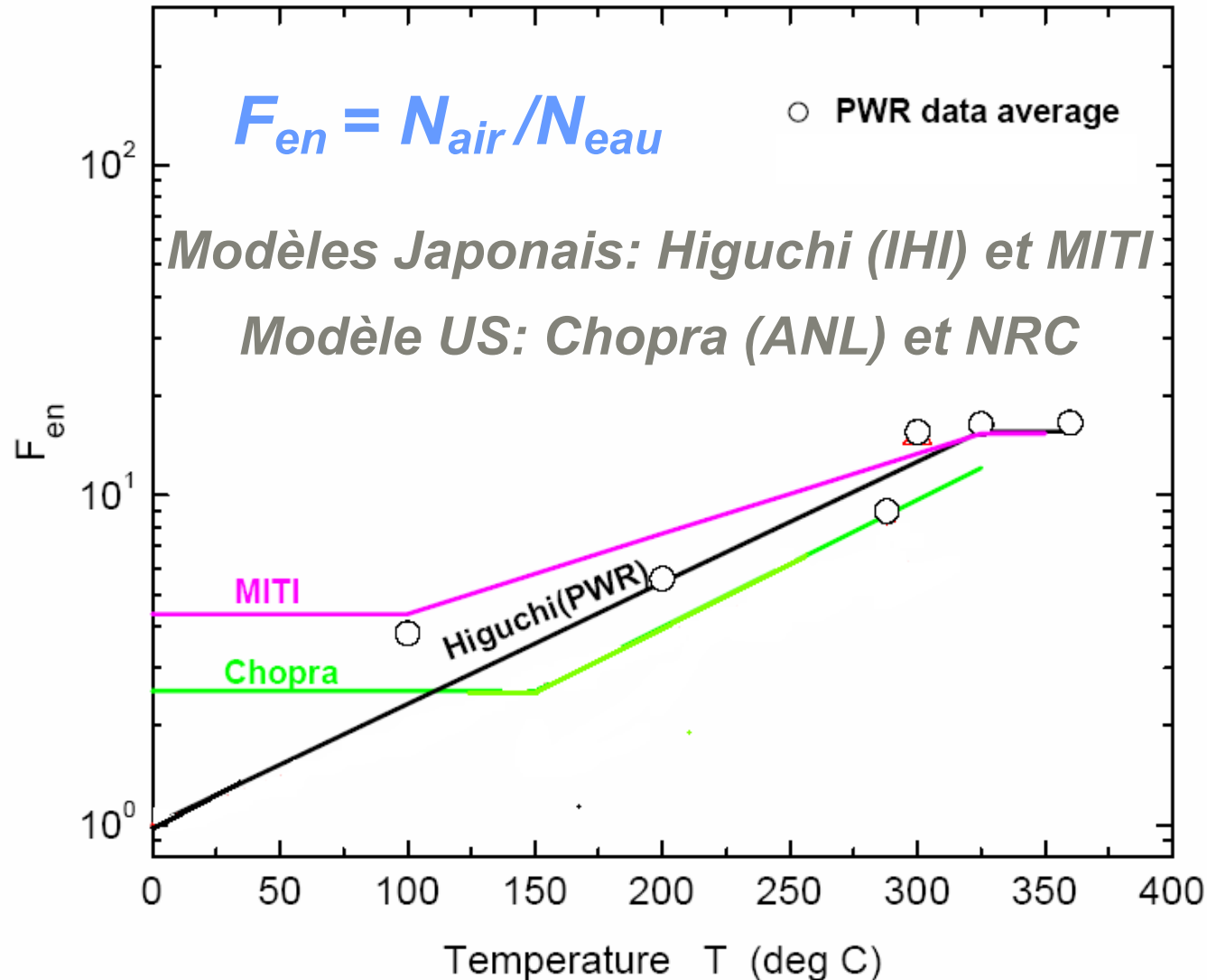
Effet d'environnement en fatigue oligocyclique

- ▶ **Nombreux essais de fatigue oligocyclique au Japon (IHI,MHI) et aux USA (ANL) en milieu eau à haute température depuis:**
 - ◆ ~ 25 ans pour les aciers au C-Mn et faiblement alliés,
 - ◆ ~ 10 ans pour les aciers inoxydables austénitiques.
- ▶ **Essais réalisés sur éprouvettes polies en milieu eau REB (Réacteur Bouillant) ou REP (Réacteur à Eau Pressurisé)**
- ▶ **Influence prépondérante des paramètres suivants sur la durée de vie en fatigue en milieu eau à haute température (< 325°C):**
 - ◆ Réduction de durée de vie plus importante à température élevée,
 - ◆ Forte réduction de durée de vie à faible vitesse de déformation,
 - ◆ Effets néfastes du niveau d'oxygène dissous du milieu eau et de la teneur en soufre (aciers au C-Mn et faiblement alliés).
- ▶ **Proposition d'expressions empiriques pour évaluer des facteurs d'effet d'environnement (F_{en}) au Japon et aux USA:**
 - ◆ $F_{en} = N_{air} \text{ (durée de vie en air)} / N_{eau} \text{ (durée de vie en eau)}$

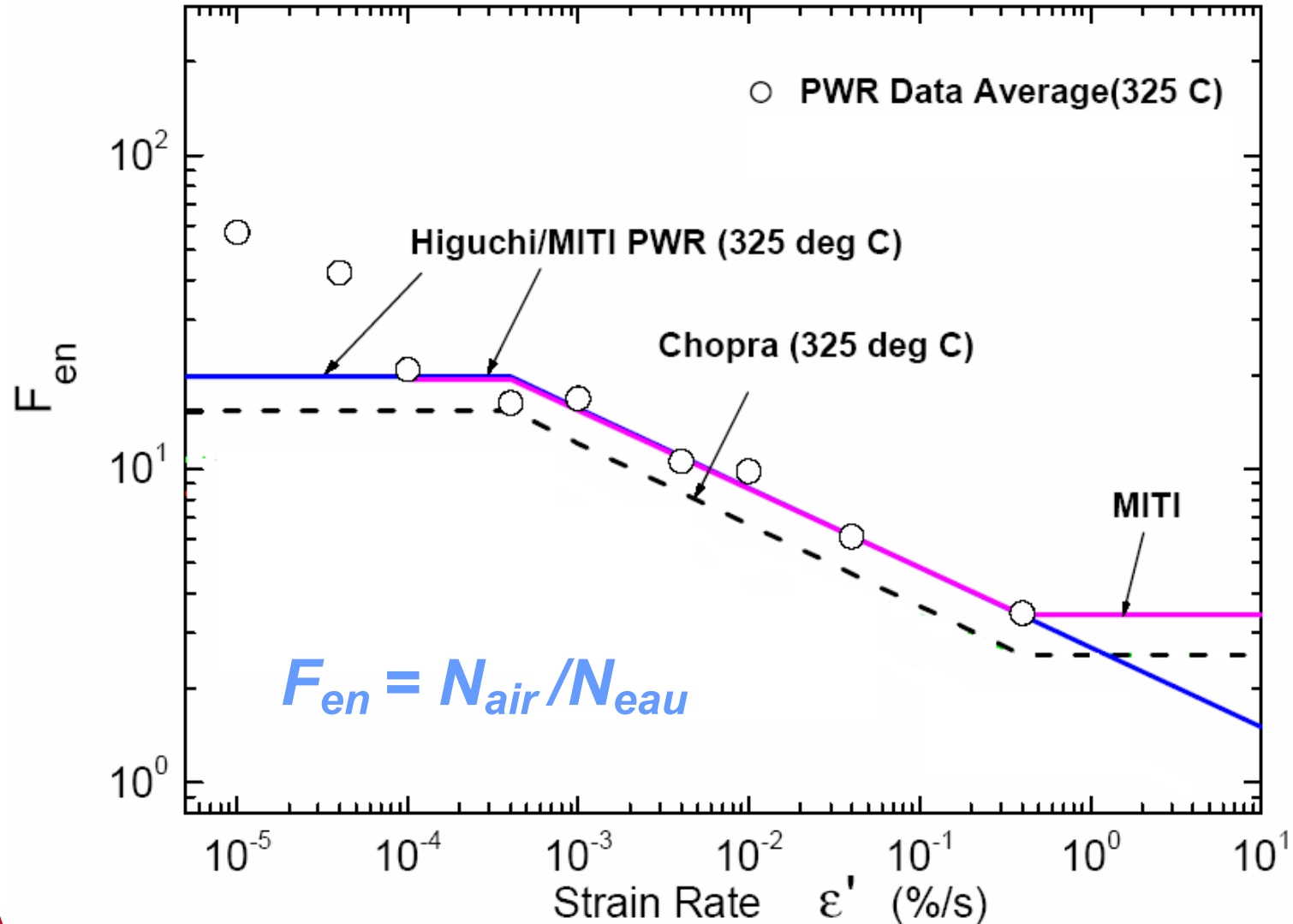
Données Américaines de fatigue oligocyclique en milieux air et eau à haute température (aciers inoxydables austénitiques)



Variation du facteur F_{en} d'effet d'environnement en fonction de la température (Aciers Inoxydables austénitiques)



Variation du facteur F_{en} d'effet d'environnement en fonction de la vitesse de déformation (Aciers inoxydables austénitiques)



Méthodologie 2007 de prise en compte des effets d'environnement en fatigue thermique

Facteur d'usage modifié: $U_{eau} = U_{air} \times F_{en}$

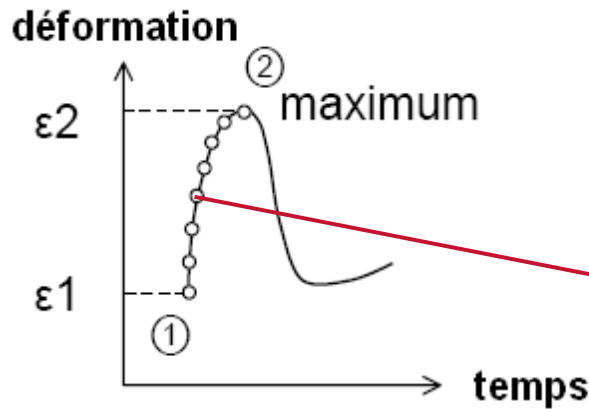
► Expression de la dernière version du facteur d'effet d'environnement applicable aux USA:

◆ $F_{en} = N_{air} / N_{eau} = \exp (0,734 - T' O' \varepsilon^*)$

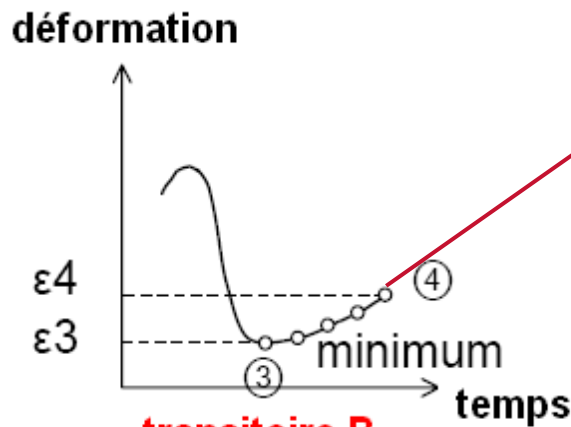
- $T' = 0$ ($T < 150^\circ\text{C}$); $T' = (T - 150) / 175$ pour $150^\circ\text{C} < T < 325^\circ\text{C}$ et $T' = 1$ pour $T > 325^\circ\text{C}$
- $\varepsilon^* = 0$ pour $\varepsilon' > 0,4 \text{ \%/s}$
- $\varepsilon^* = \ln (\varepsilon' / 0,4 \text{ \%/s})$ pour $0,0004 < \varepsilon' < 0,4 \text{ \%/s}$
- $\varepsilon^* = \ln (0,0004 / 0,4)$ pour $\varepsilon' < 0,0004 \text{ \%/s}$
- $O' = 0,281$ quel que soit le niveau d'oxygène

Evaluation du facteur F_{en} d'effet d'environnement sous sollicitations de fatigue thermique

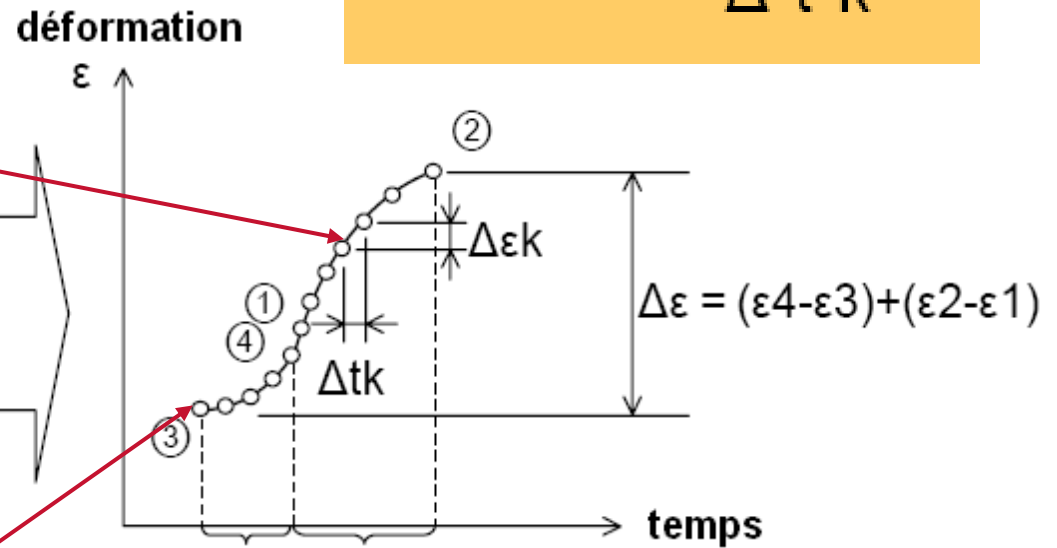
Intégration des vitesses moyennes de déformation



transitoire A
choc thermique froid



transitoire B
choc thermique chaud



transitoire B **transitoire A**

$$\dot{\Delta \epsilon}_k = \frac{\Delta \epsilon_k}{\Delta t_k}$$

$$F_{enk} = f(\dot{\Delta \epsilon}_k, T_k, DO_k)$$

$$F_{en} = \sum_{k=1}^n F_{enk} \frac{\Delta \epsilon_k}{\Delta \epsilon}$$

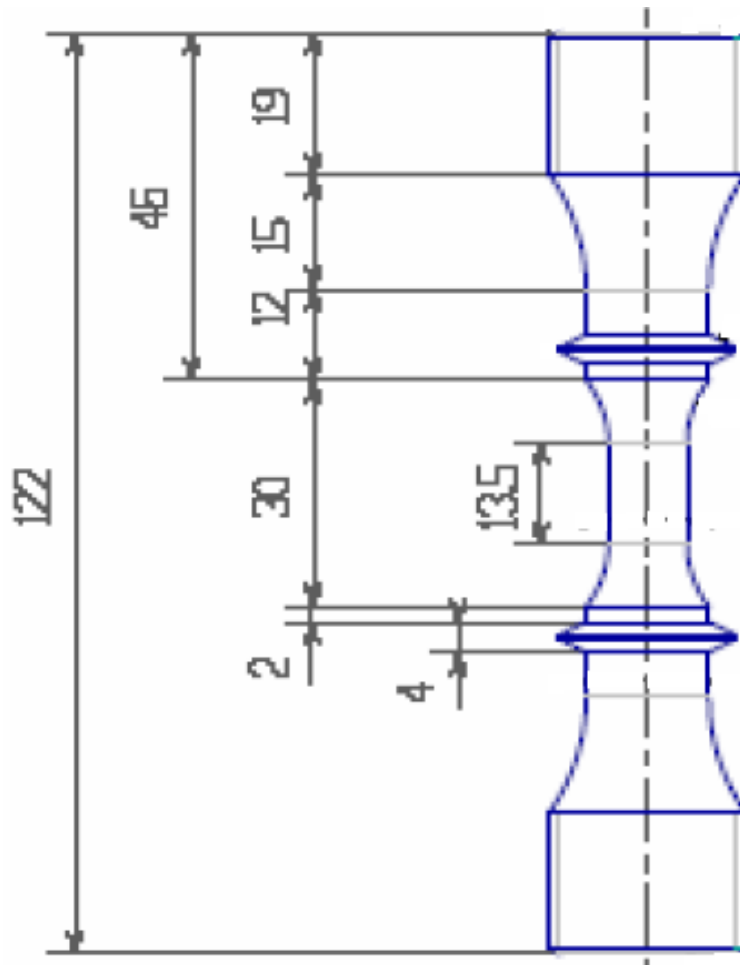
Programme de R&D sur le comportement en fatigue oligocyclique d'un acier 304L en milieu eau REP

- ▶ **Mise au point des essais de fatigue oligocyclique en autoclave**
 - ◆ **Equipement de deux machines pour essais en milieu eau REP:**
 - Aménagements d'autoclaves pour essais à 300°C et ~ 150 bars,
 - Mise en place de systèmes de conditionnement du milieu eau REP,
 - Usinage de montages pour la fixation des capteurs de déformation,
 - Calibrations du système de pilotage à déformations imposées,
 - Mise au point d'essais avec signaux triangulaires et complexes,...
 - ◆ **Fixation du capteur de déformation sur les épaulements de l'éprouvette afin éviter tout risque d'amorçage sur la partie utile sous les couteaux de fixation du capteur de déformation**
- ▶ **Réalisation d'essais de fatigue oligocyclique préliminaires:**
 - ◆ **Essais sur éprouvettes cylindriques Ø 9 mm en air et eau à 300°C,**
 - ◆ **Essais avec $\varepsilon' = 0,4$ %/s pour $\Delta\varepsilon_t / 2 = \pm 0,2$ %, $\pm 0,4$ % ou $\pm 0,6$ %,**
 - ◆ **Essais en eau primaire REP avec $\varepsilon' = 0,01$ %/s ($\Delta\varepsilon_t / 2 = \pm 0,6$ %).**

**Développement de moyens d'essais de fatigue oligocyclique
en milieu eau primaire REP à 300°C et ~ 150 bars
au Centre Technique d'AREVA NP au Creusot**



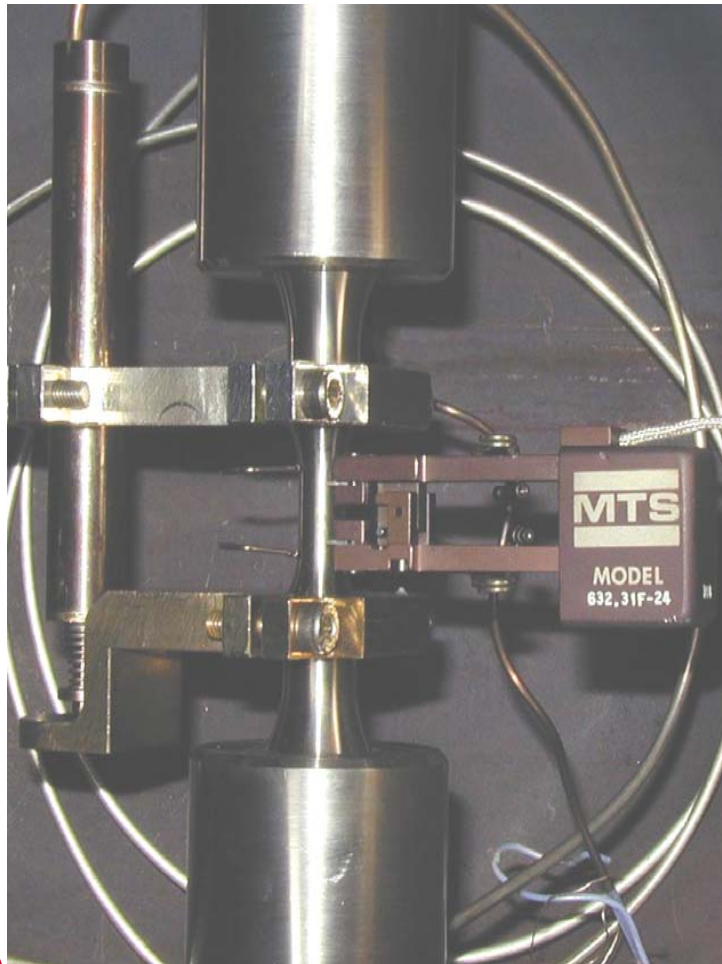
Eprouvette de fatigue et extensomètre utilisés pour les essais de fatigue oligocyclique en milieu eau REP



Extensomètres utilisés pour les essais de fatigue oligocyclique en air à 300°C et en milieu eau REP

Configuration d'étalonnage

Configuration d'essais

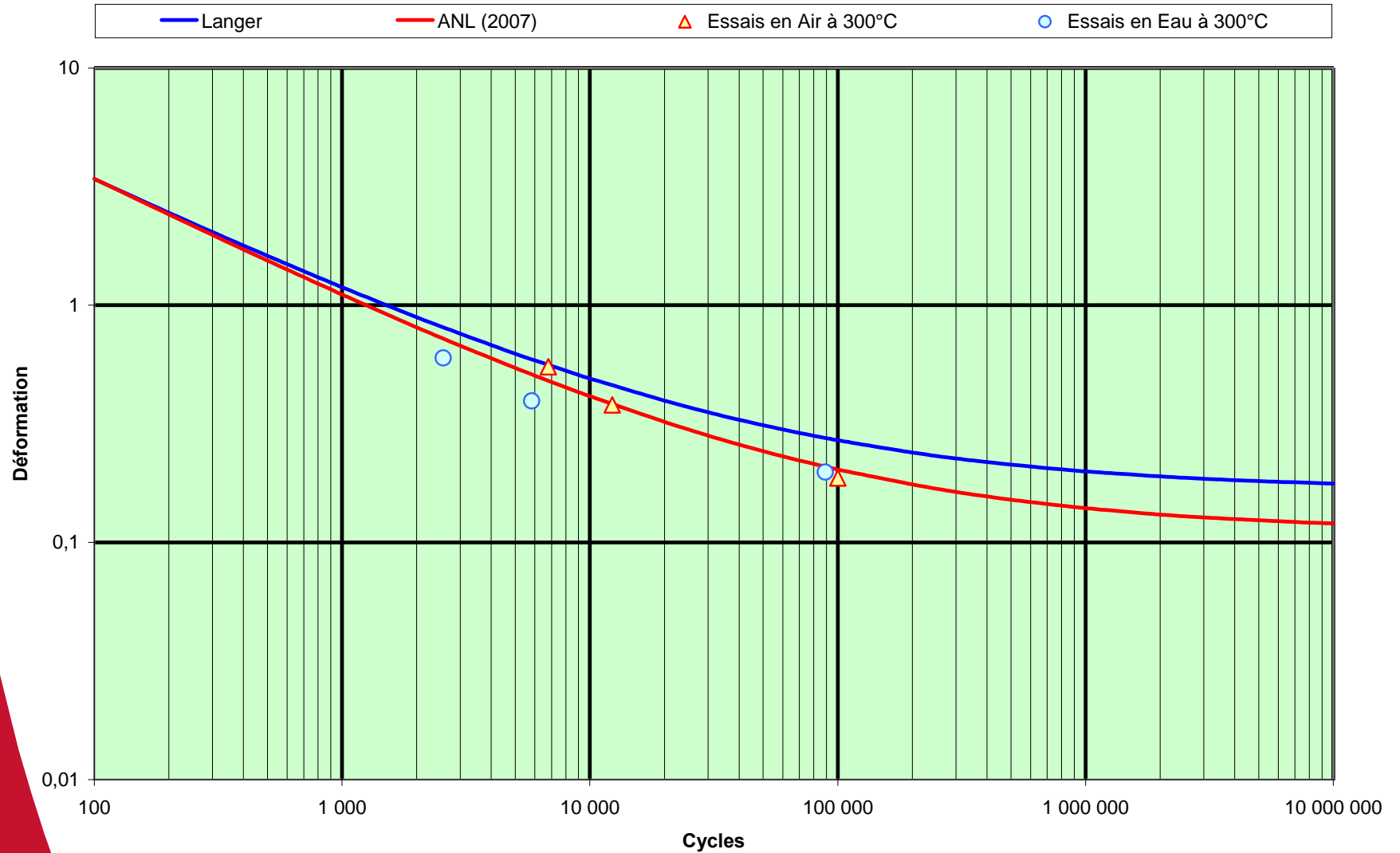


Milieu air



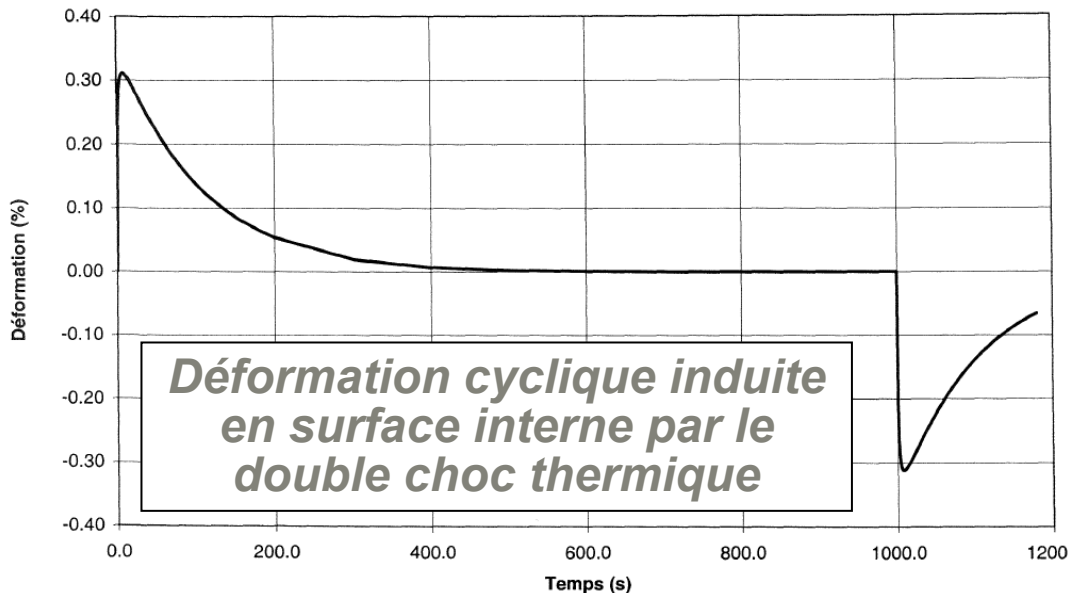
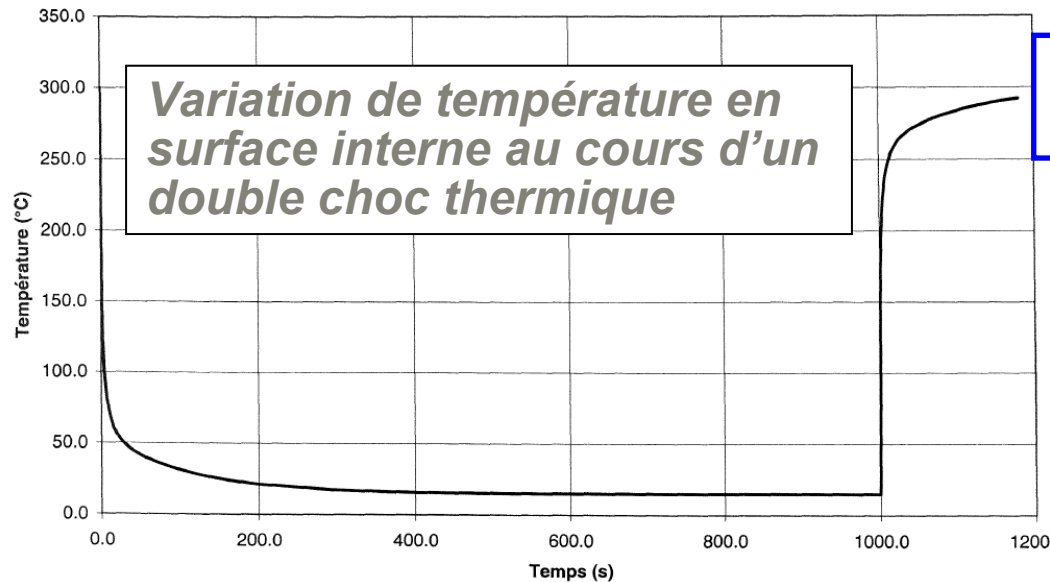
Milieu eau primaire REP

Essais préliminaires de fatigue oligocyclique à 300°C en air et en eau avec $\epsilon' = 0,4$ %/s - Courbes moyennes ASME et ANL

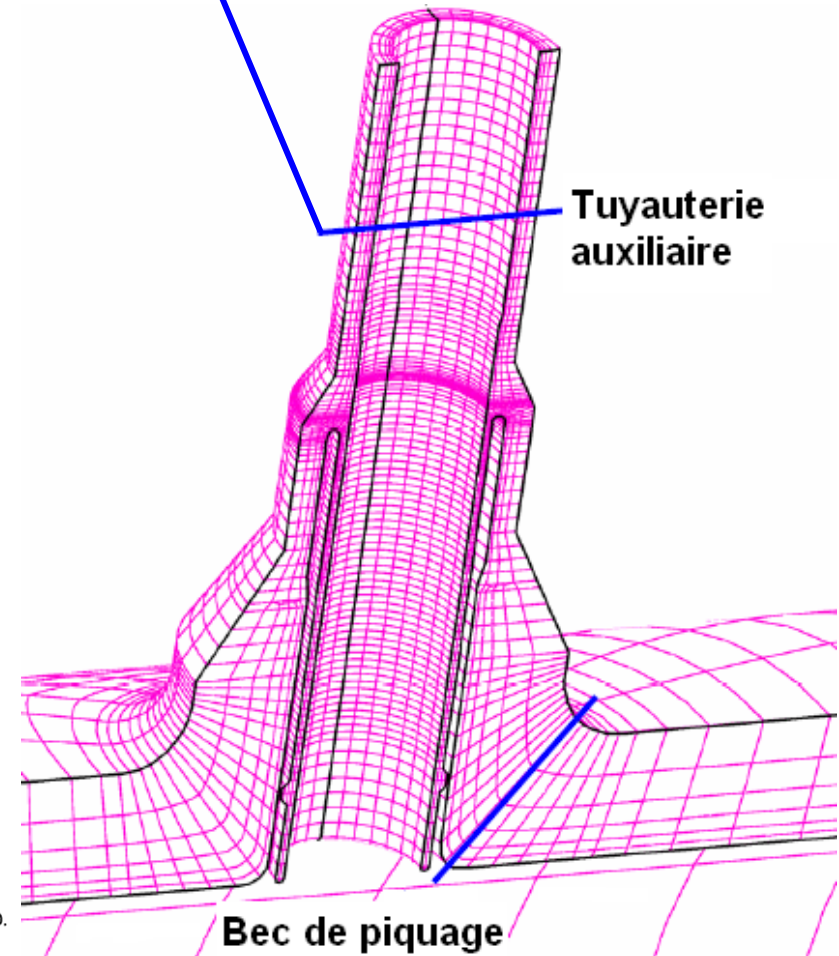


Essais réalisés avec des signaux triangulaires

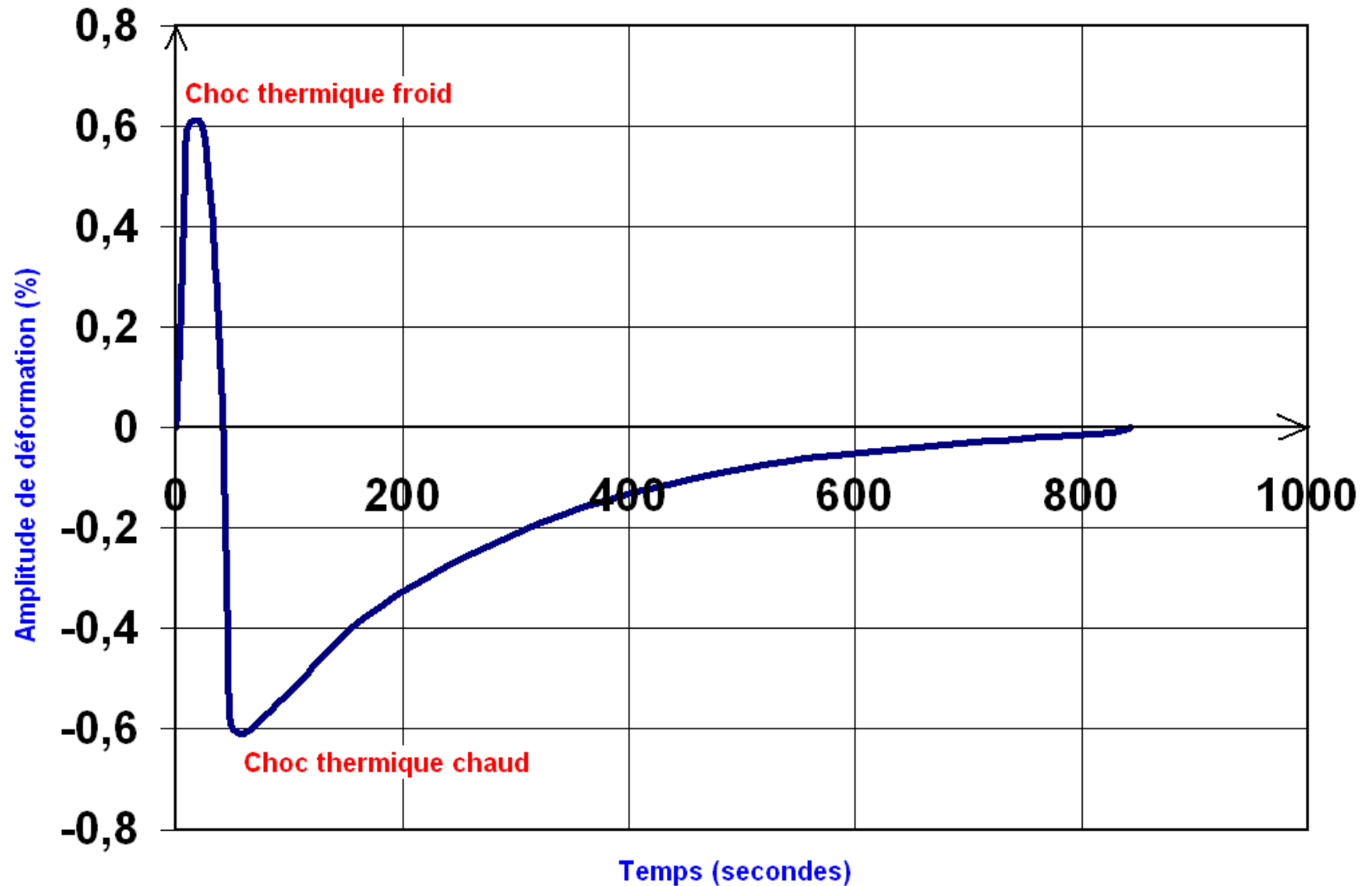
Exemple d'évaluation des sollicitations thermiques sur une soudure entre ligne auxiliaire et piquage primaire



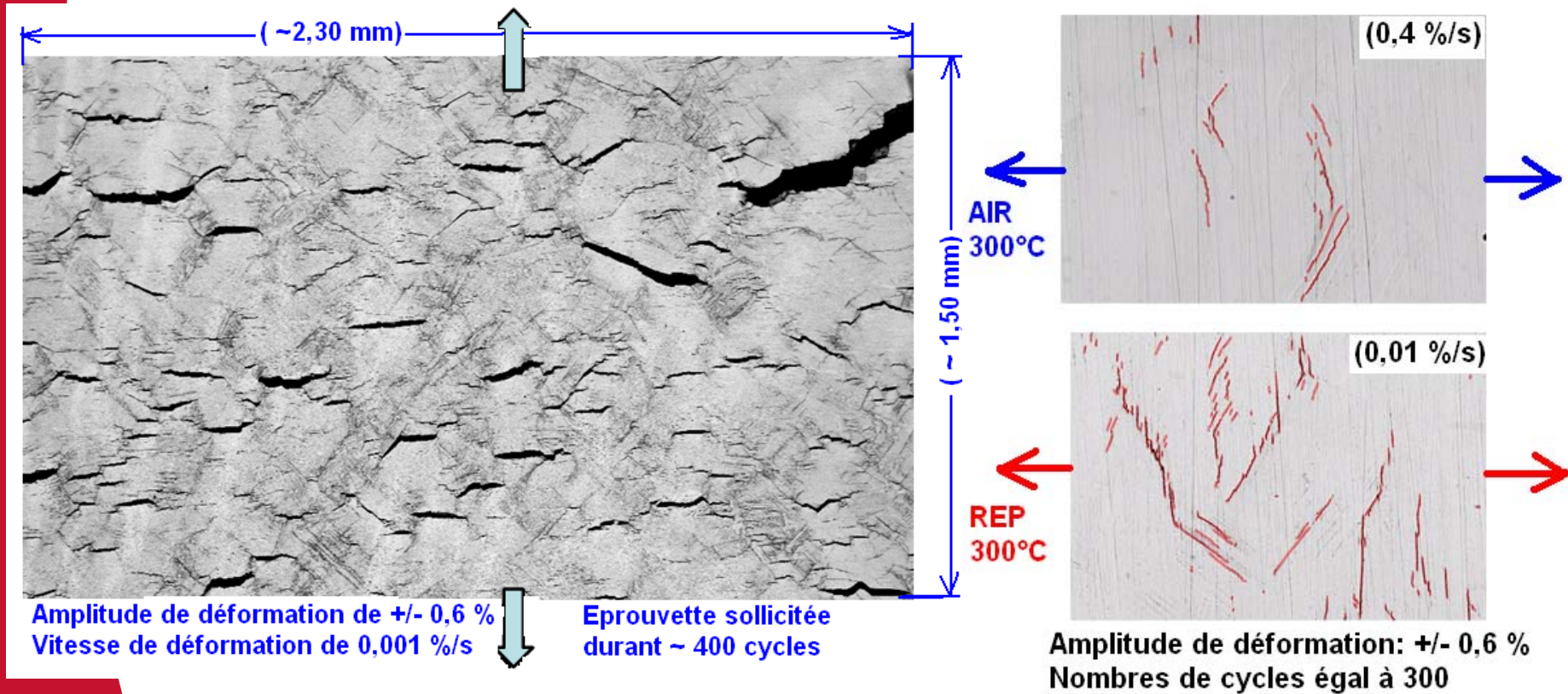
Position soudure entre une ligne auxiliaire et un piquage primaire



Essai de fatigue oligocyclique sous chargement complexe proche d'un transitoire thermique de fonctionnement (double choc thermique)



Exemples d'endommagements observés sur la surface d'éprouvettes polies pré-cyclées en air ou en milieu eau REP à différentes vitesses de déformation



Surface désquamée - éprouvette tractionnée en fin d'essai pour ouvrir les microfissures

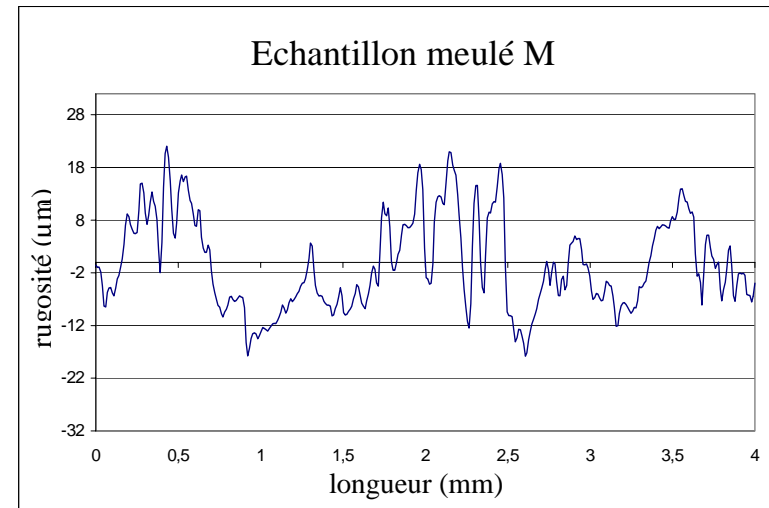
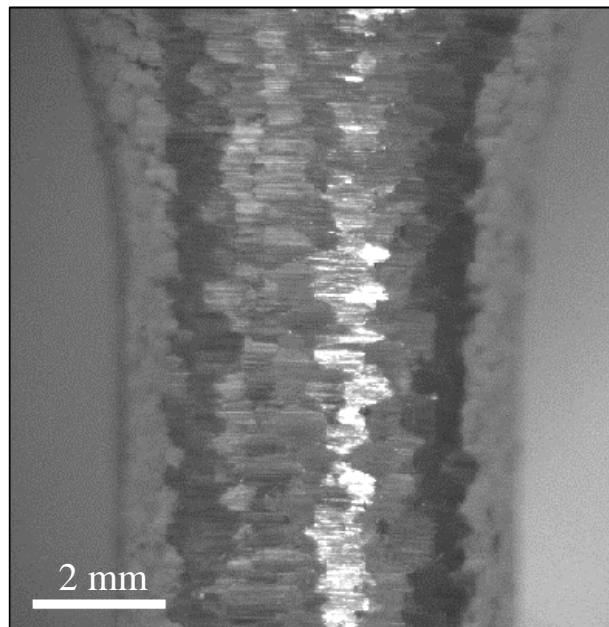
Eprouvettes sollicitées à même niveau en air et en eau REP à 300°C durant 300 cycles

Premières conclusions du programme d'essais de fatigue oligocyclique en cours sur acier 304L en milieu eau primaire REP (état poli laboratoire)

- ▶ **Résultats d'essais effectués avec des signaux triangulaires relativement proches de ceux prévus par les modèles d'évaluation des facteurs « Fen » Japonais et US**
- ▶ **Durées de vie obtenues sous chargements complexes représentatifs bien supérieures à celles prédites à l'aide des expressions de calcul des facteurs « Fen » Japonais ou US**
- ▶ **Pour des signaux complexes, mise en évidence, sur acier 304L, du conservatisme excessif des méthodes applicables d'évaluation des effets d'environnement en fatigue thermique**

Perspectives du programme d'essais de fatigue en milieu eau primaire REP

- ▶ **Reproduction en laboratoire d'histoires de chargements thermiques réalistes proches de ceux imposés sur certains composants REP en service comme les piquages primaires**
- ▶ **Réalisation en milieu eau REP à 300°C et ~ 150 bars d'essais de fatigue oligocyclique sur éprouvettes meulées ayant un état de surface voisin de celui des composants**



Rugosité $R_t \approx 50 \mu\text{m}$

***High Cycle Thermal Fatigue Issues in
PWR Nuclear Power Plants
Life Time Improvement of some
Austenitic stainless Steel Components***

Jean Alain LE DUFF, André LEFRANCOIS, Yves MEYZAUD
AREVA NP – Materials Technology & Chemistry Department

Jean Philippe VERNOT, Dominique MARTIN
AREVA NP- Fluids & Structural Mechanics Department

José MENDEZ, Yoann LEHERICY
ENSMA – Laboratoire de Mécanique et de Physique des Matériaux

AREVA NP Activities Reactors & Services Division

- ▶ **Design and Building of both types of light water reactors, the PWR and the BWR.**
- ▶ **Reactors & Services Division Provides the necessary services and equipment for power plant maintenance and operations.**
- ▶ **AREVA NP is the world's leading supplier of nuclear power equipment and services.**
- ▶ **Manufacturing facilities are located primarily in France (Chalon-sur-Saône, Jeumont), Germany and the United States**

High Cycle Thermal Fatigue issues in PWR Nuclear Power plants & root causes

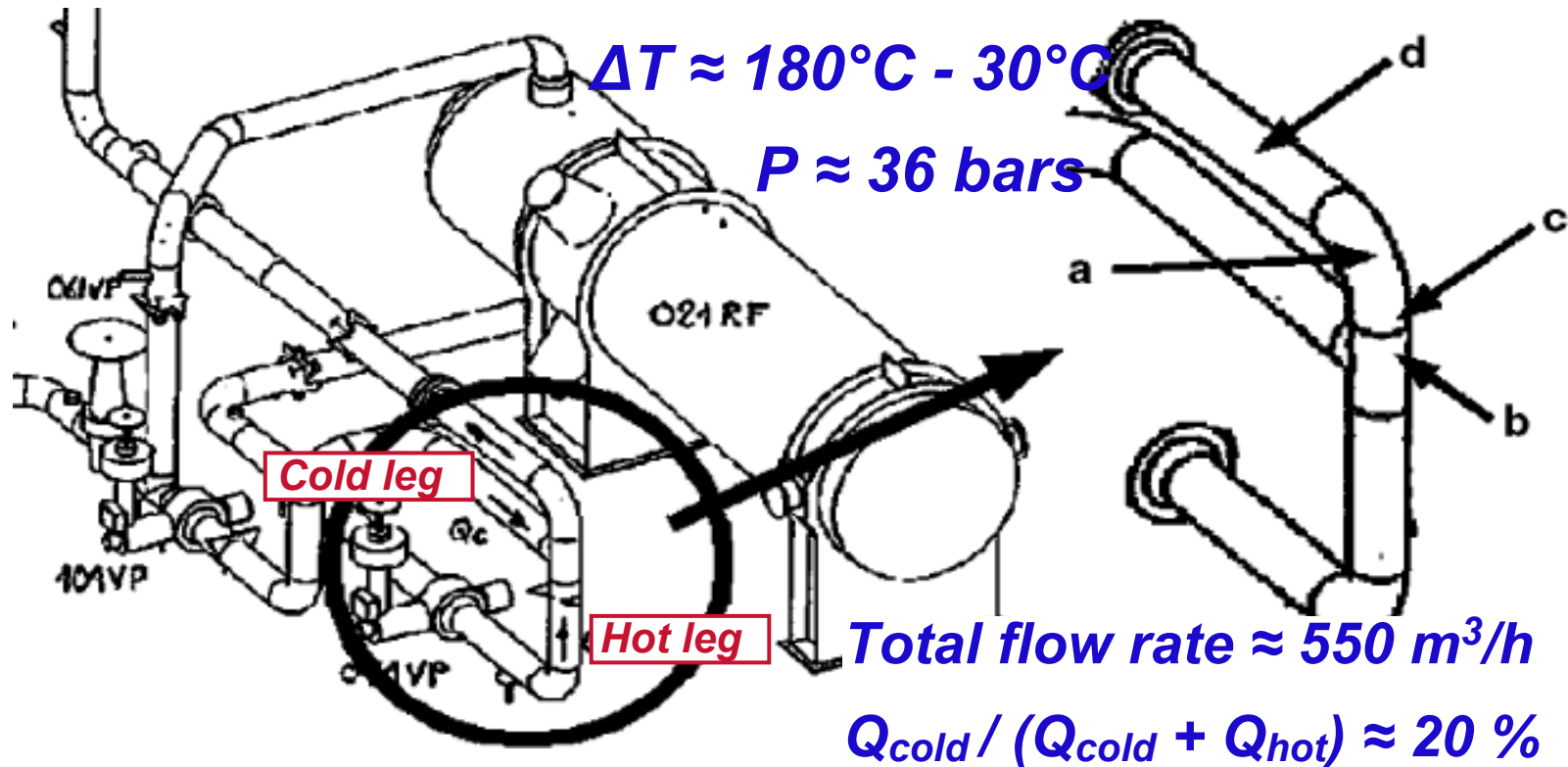
- ▶ **Thermal Fatigue concerns essentially 304L and 316L austenitic stainless steel components**
- ▶ **Residual Heat Removal System (1988)**
 - ◆ High Cycle Thermal fatigue in RHRs mixing tees
- ▶ **Safety injection lines and dead legs (1987)**
 - ◆ Hot vortices coming from main coolant lines in connected lines and cold valve leakage coming from charging pumps
- ▶ **Reactor coolant pumps (first issues in 1986)**
 - ◆ Network of cracks in pump shafts, thermal barriers,...
- ▶ **Regenerative heat exchangers (Japan, 99/03)**
 - ◆ Mixing of main flow and by pass flow at low ΔT inside an elbow located after outlet nozzles.

High Cycle Thermal Fatigue issues in PWR Nuclear Power plants & root causes

Residual Heat Removal System mixing tees

- ▶ **CIVAUX 1: 180mm through wall crack (May 1998)**
- ▶ **Through wall crack found in an elbow weld**
- ▶ **Leak of ~ 30 m³/h in the containment**
- ▶ **Mixing of cold and hot water ($\Delta T \approx 150^{\circ}\text{C}$)**
- ▶ **Fatigue damage in all 900/1300 MWe & N4 plants**
- ▶ **Strong aggravating effect of local weld geometry**
- ▶ **Detrimental effect of high surface roughness with network of cracks in grinding areas**

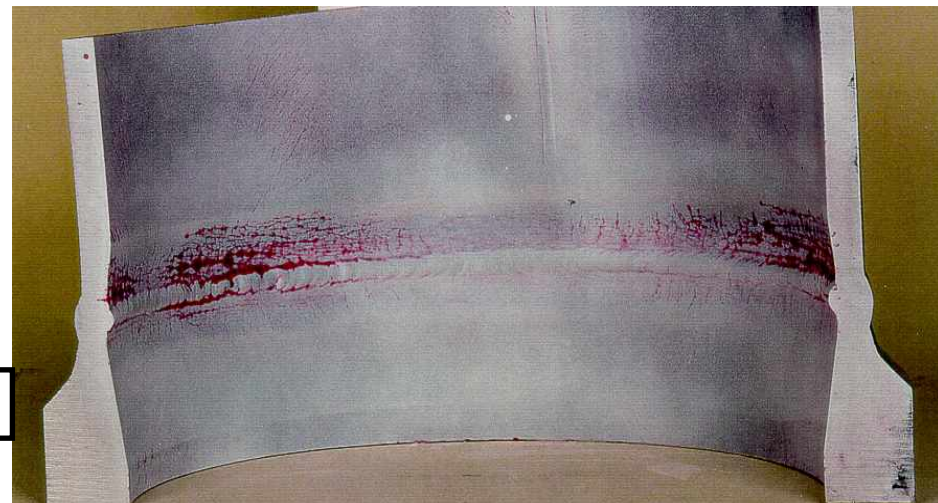
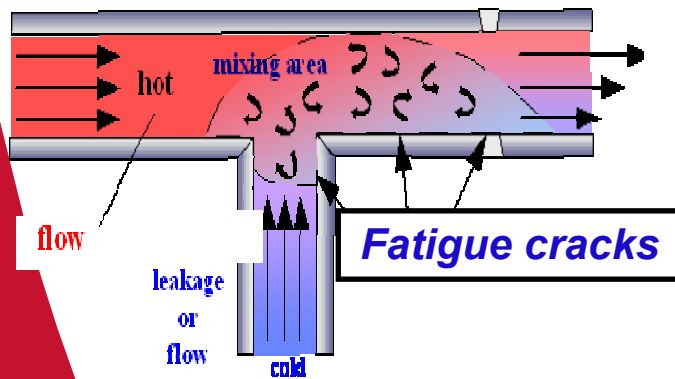
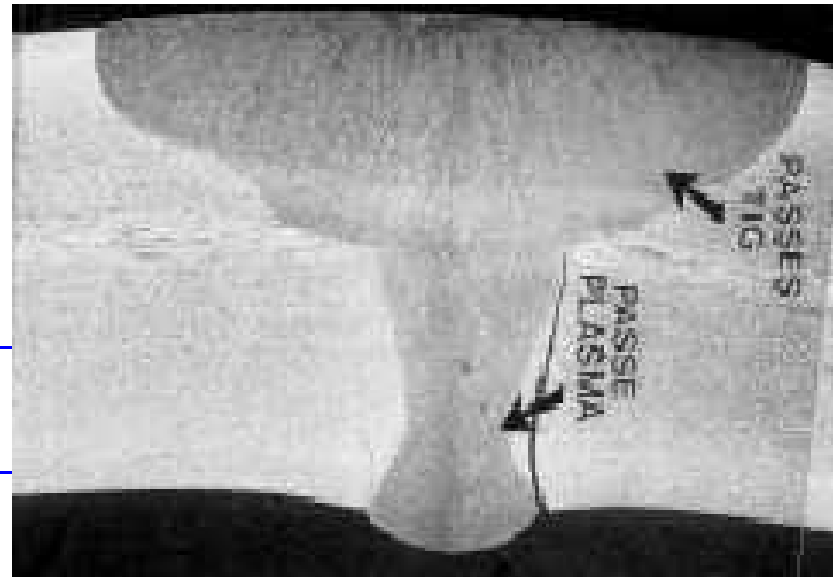
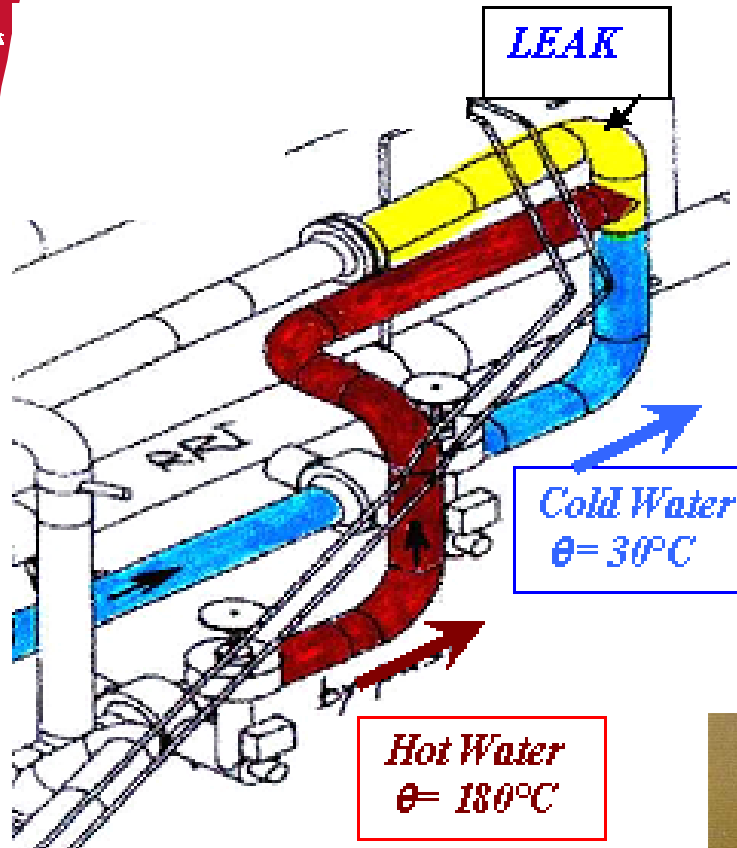
Overall view of the RHRS loop of CIVAUUX 1



► **Location of thermal fatigue damage (1500 h) :**

- ◆ (a) Trough crack in the elbow located after the mixing tee
- ◆ (b) Appearance of a network of cracks in the mixing tee
- ◆ (c) Network and cracks near the root of the tee/elbow weld
- ◆ (d) Network and cracks in the straight piping section

CIVAUX 1 EVENT



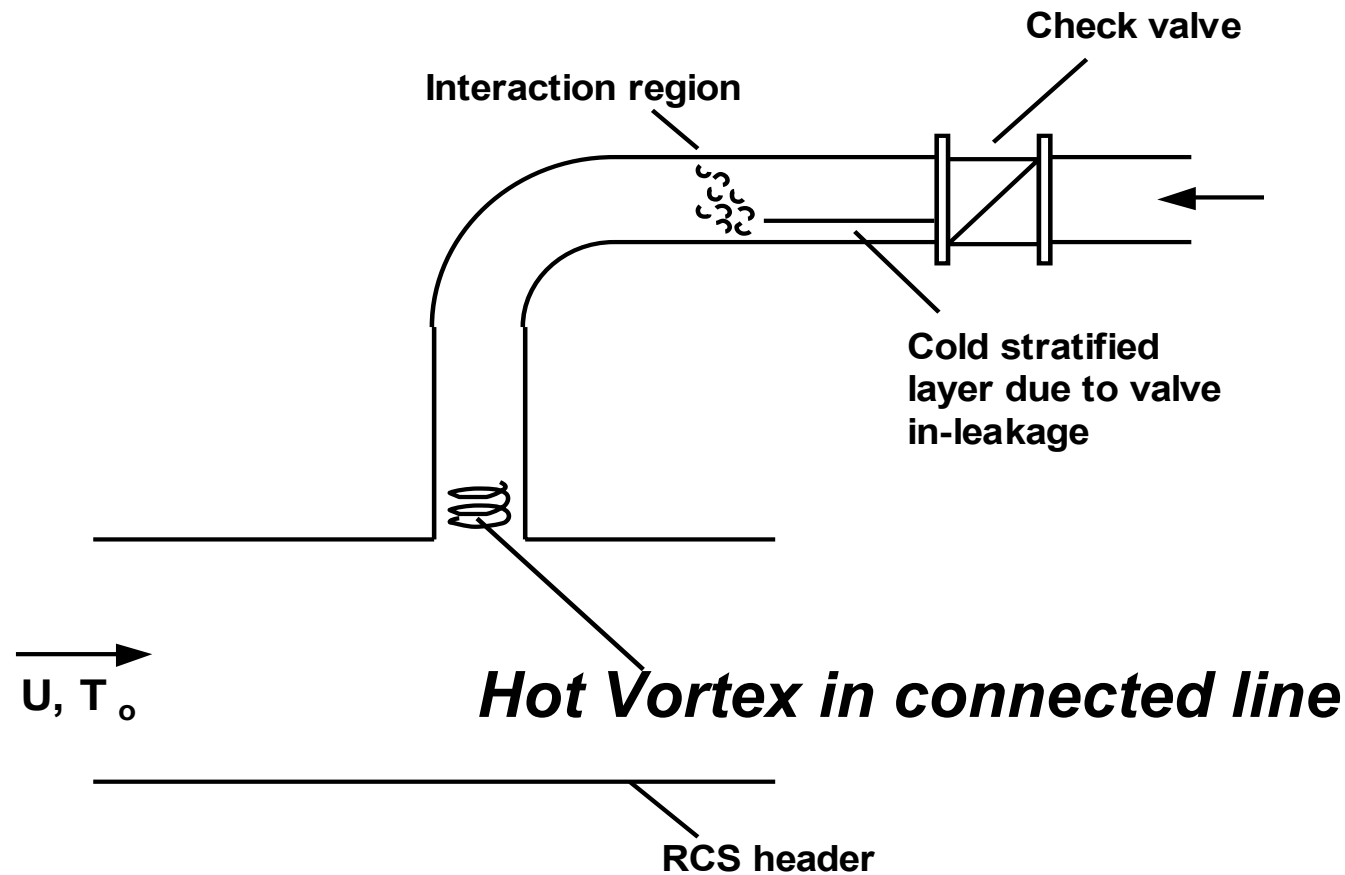
High Cycle Thermal Fatigue issues in PWR Nuclear Power plants & root causes

Safety injection lines from charging pumps

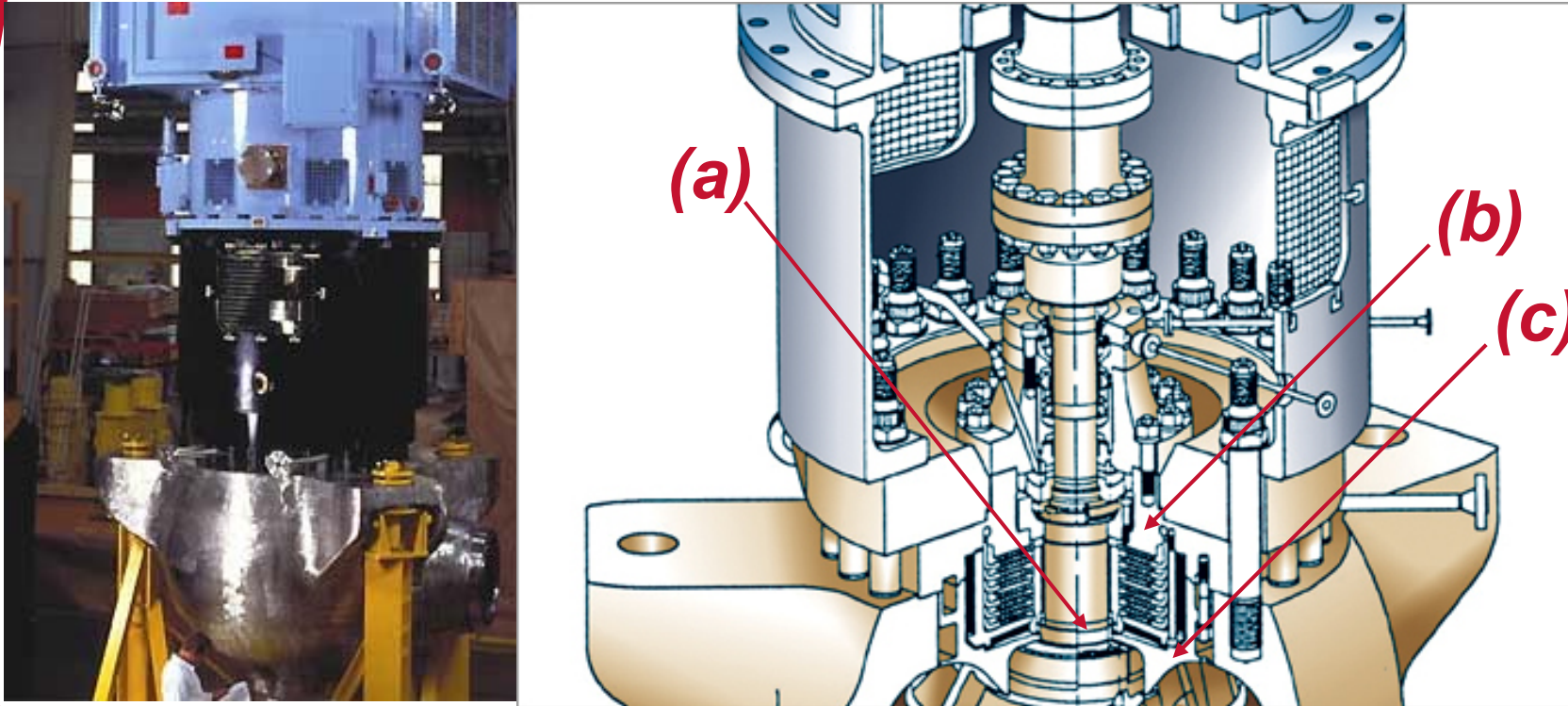
- ▶ **Hot vortices in connected dead legs (high ΔT)**
- ▶ **Interaction of hot turbulent penetration coming from main coolant line with cold valve leakage**
- ▶ **Unexpected cold valve in-leakage coming from higher pressures in charging system**
- ▶ **Detrimental effects of weld geometry and of high roughness profiles of ground surface**
- ▶ **Leak events in Farley (1987), Tihange (1988), Dampierre 2 (1992), Dampierre 1 (1996), ...**

Thermal fatigue in Dead leg - Unisolable piping connected to PWR Reactor Coolant System

- ▶ **Safety injection dead legs (Farley, Tihange,...)**
- ▶ **Up / Horizontal Branch line piping configuration**



Thermal Fatigue in reactor coolant pump



► **Location of thermal fatigue damage (1986)**

- ◆ (a) Pump shaft (network of surface cracks)
- ◆ (b) Thermal barrier flange (very low ΔT)
- ◆ (c) Thermal barrier envelope and diffuser

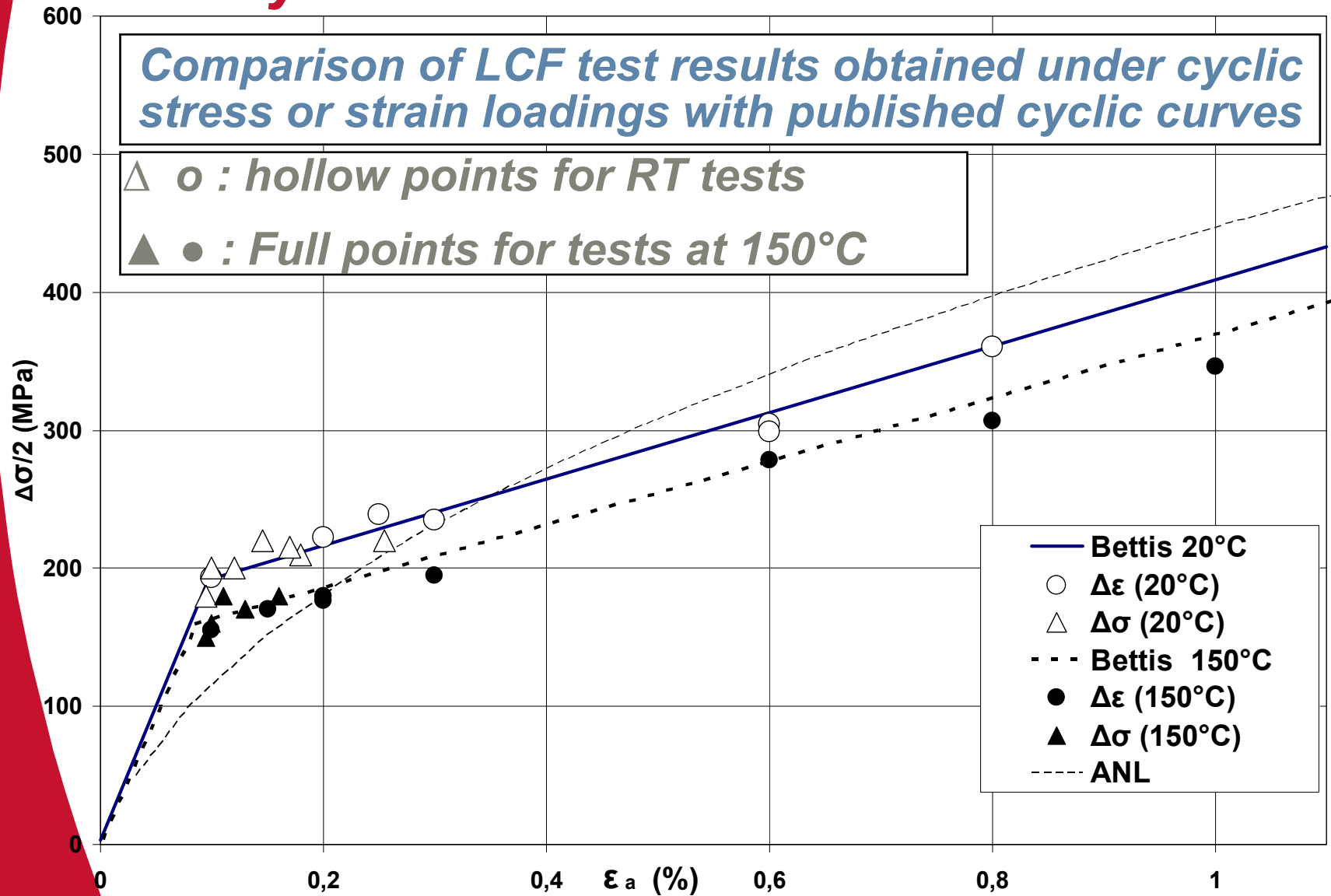
Operating experience and incidents on austenitic stainless steel components

- ▶ **Thermal loads like stratification, vortex penetrations or mixing of hot and cold water are the main root causes of incidents**
- ▶ **Incidents occur in different systems with only few leaks (RHRS, SIS/Dead Legs, RCP)**
- ▶ **Following aggravating factors identified**
 - ◆ **Detrimental effects of local weld geometry and of high surface roughness (ground area) on HCF strength of austenitic stainless steel components**
 - ◆ **Reduction of HCF strength with the mean stress due to stratification & high temperature gradients**

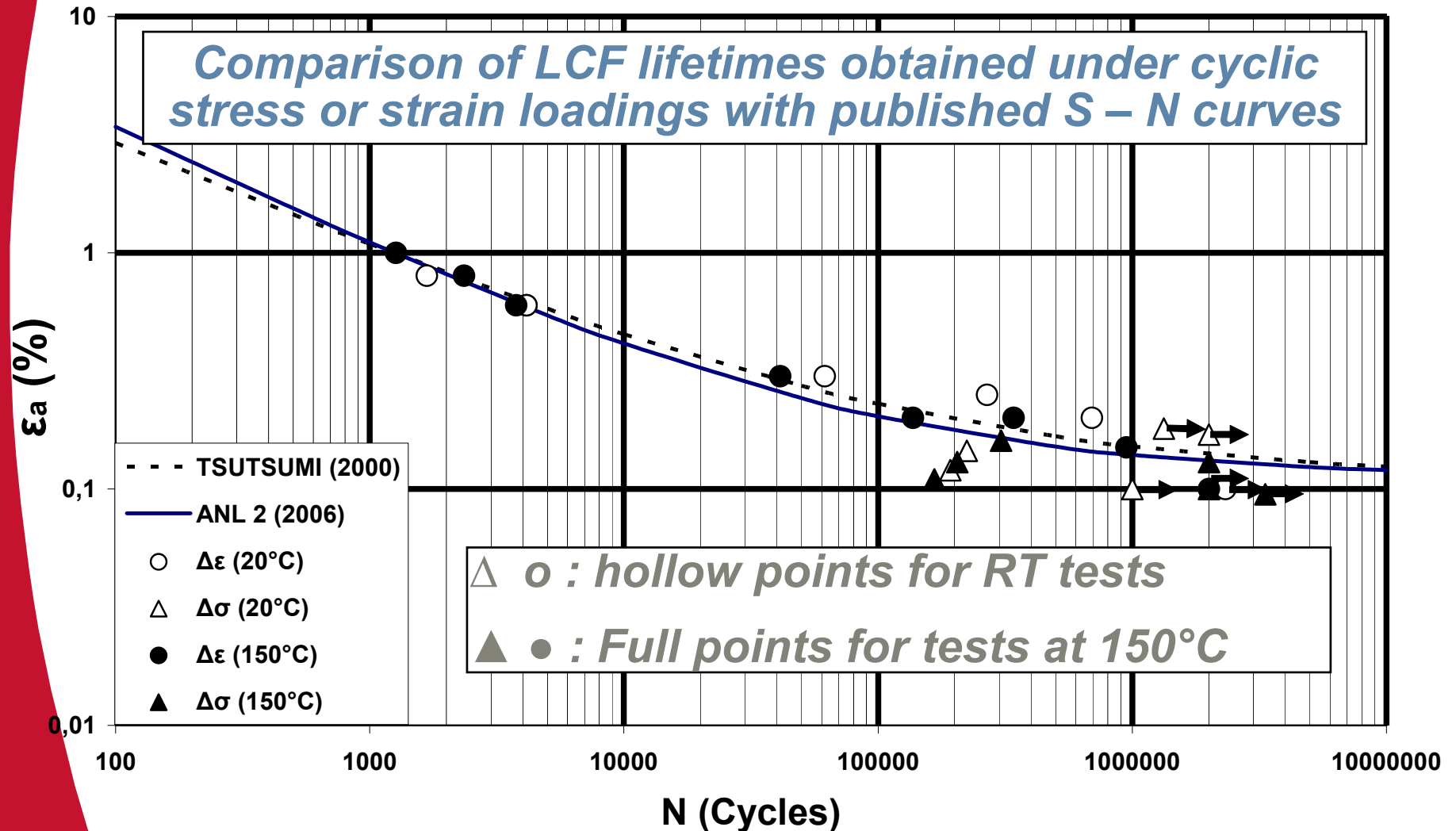
Fatigue test programs conducted on an austenitic stainless steel type 304L

- ▶ **Objectives was to increase knowledge about the LCF & HCF behavior of austenitic stainless steels**
- ▶ **Three R & D programs on LCF & HCF were carried on the following subjects by AREVA NP & ENSMA:**
 - ◆ **Evaluation of the effect of loading conditions ($\Delta\sigma$ or $\Delta\varepsilon$ with and without mean stress or mean strain) on cyclic stress strain behavior and lifetime of polished samples**
 - ◆ **1st ENSMA doctoral thesis (2003) on the effect of mean stress and surface finish on HCF strength of 304L SS at RT (effect of polishing, turning and grinding conditions)**
 - ◆ **2nd ENSMA doctoral thesis (2006) on the effect of LCF pre-damage on the subsequent HCF strength of a 304L SS at RT for polished and ground surface conditions**

1st program on effect of loading conditions Cyclic stress strain behavior of 304L SS

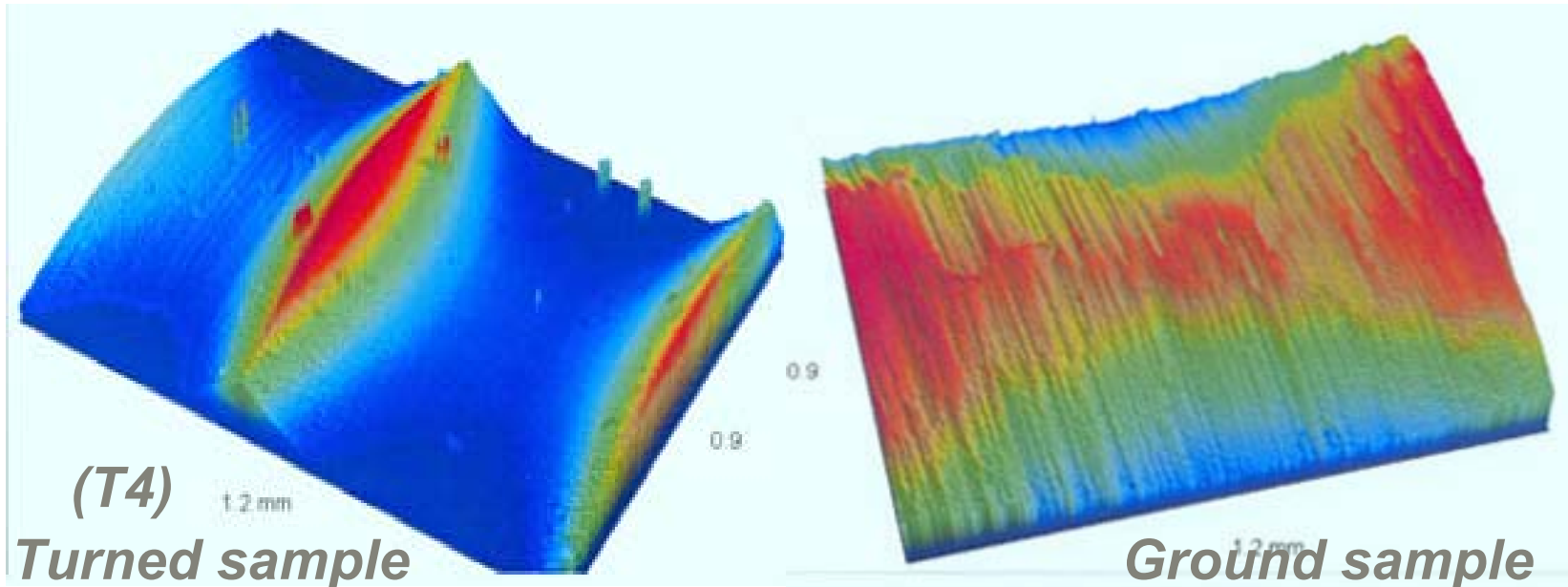


1st program on effect of loading conditions



LCF tests under stress or strain control

Mean stress and surface finish effects on HCF strength of 304L (ENSMA thesis, S. Petitjean)

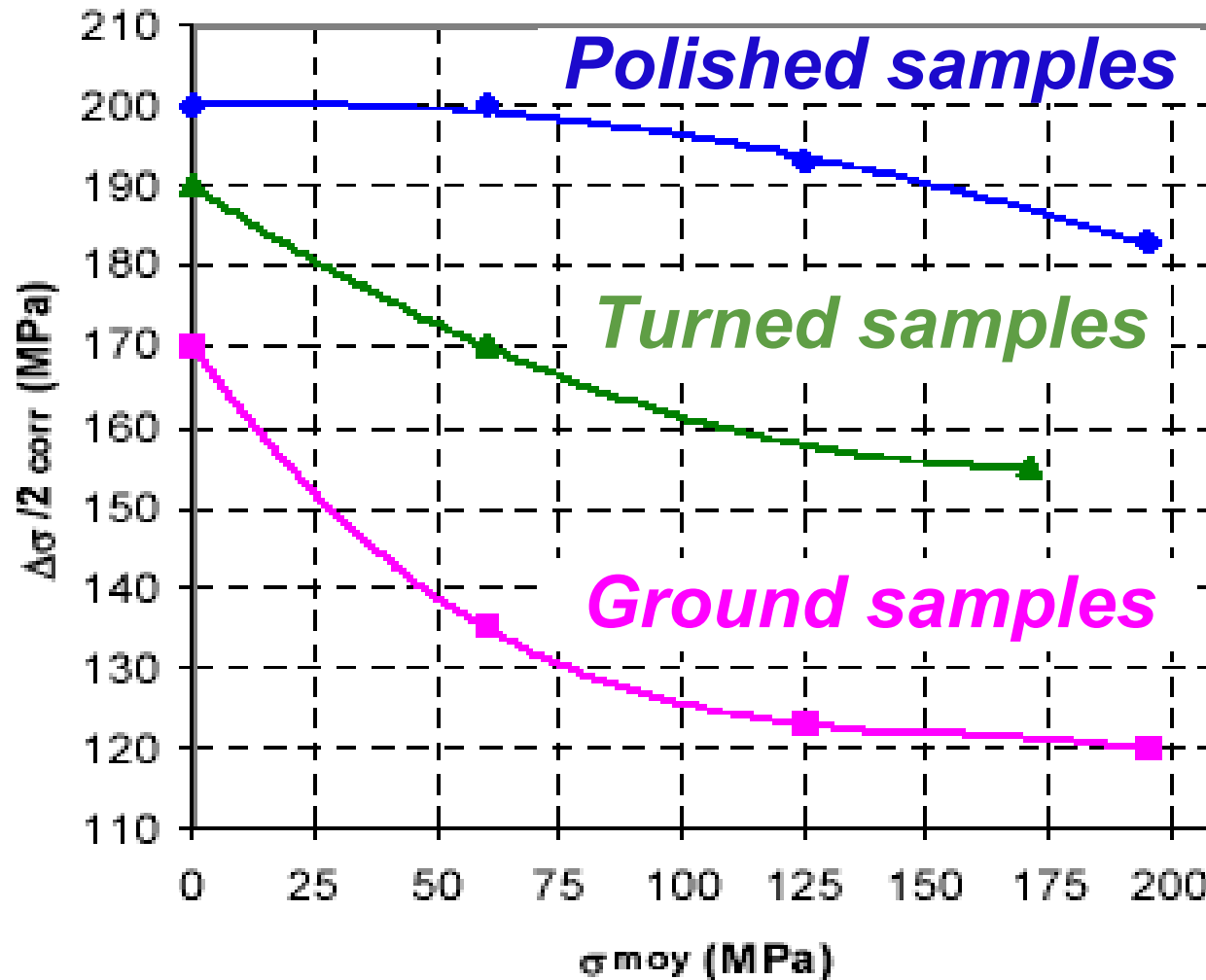


► 3D cartography of turned or ground sample surface:

- ◆ Turned sample T4 surface striations with $R_t \sim 80 \mu\text{m}$ (other turned samples with $R_t \sim 10 \mu\text{m}$ and $\sim 40 \mu\text{m}$)
- ◆ Ground sample surface striations with $R_t \sim 40 \mu\text{m}$
- ◆ Evaluation of stress concentration factors at the bottom of turned ($1 < K_t < 1.1$) and ground samples ($K_t \sim 3.2$)

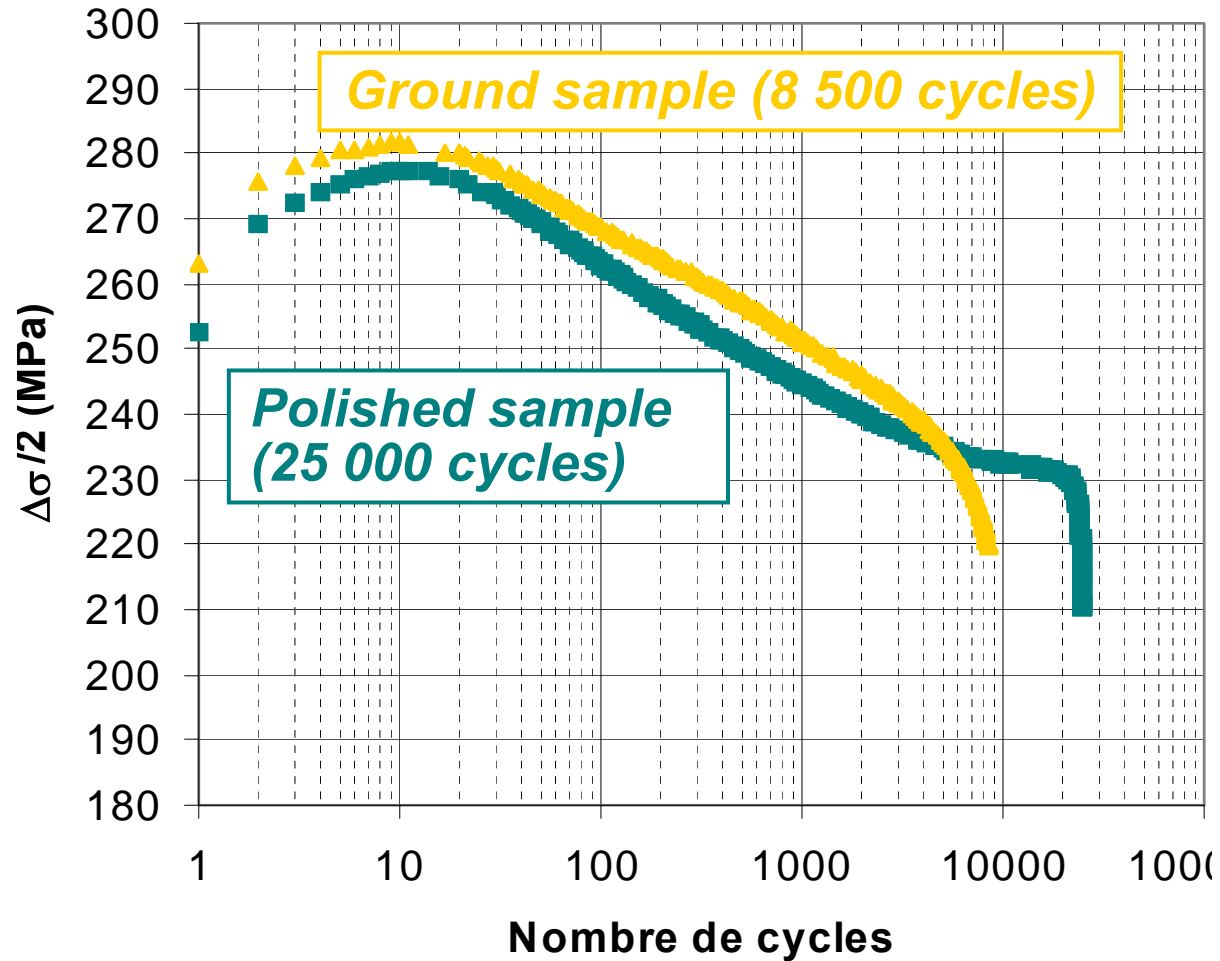
Mean stress and surface finish effects at RT (304L)

- HCF strength (10^7 cycles) versus mean stress for three surface conditions (Polished, Turned, ground samples)

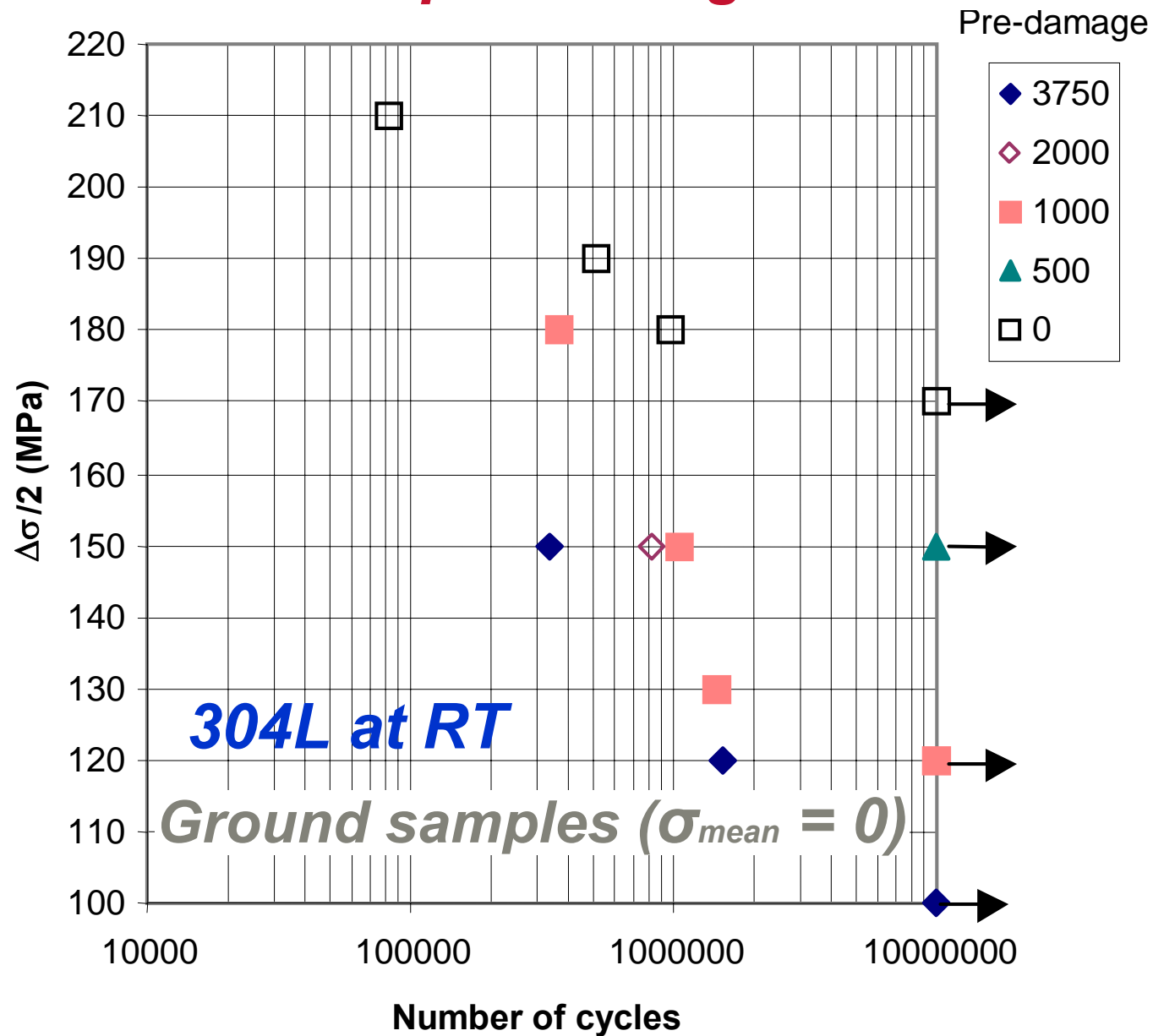


LCF behavior of 304L SS in air at RT ($\epsilon_a = \pm 0,3 \%$)

- ▶ **Comparison of the LCF behaviors and lifetimes of polished ($R_t < 1 \mu\text{m}$) & ground samples ($R_t \sim 40 \mu\text{m}$)**



Effect of LCF pre-damage on HCF strength



Main conclusions on the LCF & HCF programs

- ▶ **No effect of loading conditions on the cyclic stress strain behavior of polished 304L stainless steel**
 - ◆ No mean strain effect on LCF & HCF behavior
 - ◆ Some effect of the mean stress on HCF strength
- ▶ **Very detrimental effect of mean stress on HCF strength of ground samples at room temperature**
- ▶ **Detrimental effect of LCF pre-damage loadings on the subsequent HCF strength much important on ground samples than on polished specimens**
- ▶ **Manufacturing improvement as removal of weld roots and polishing of inner surface of austenitic stainless steel components can increase very significantly their HC thermal fatigue strength**