



# Influence de l'environnement sur la propagation de fissure: Manifestations, analyse et pistes de modélisation

G. Hénaff

Institut P' • UPR CNRS 3346

Département Physique et Mécanique des Matériaux  
ENSMA • Téléport 2

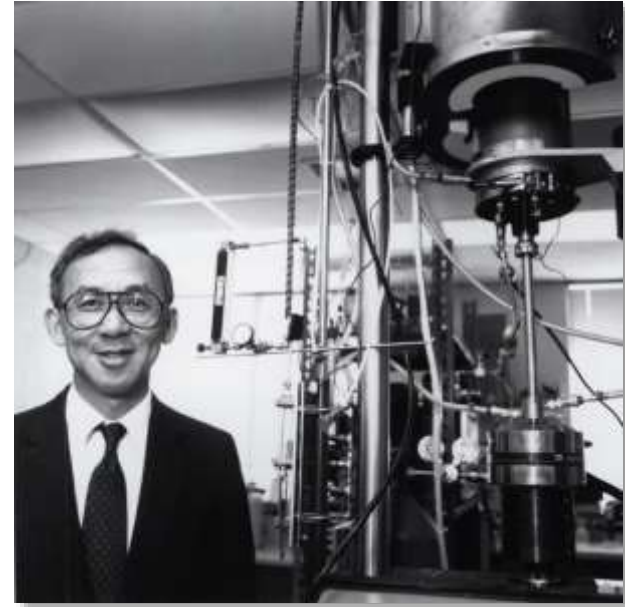
1, avenue Clément Ader • BP 40109  
F86961 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL Cedex



# Introduction

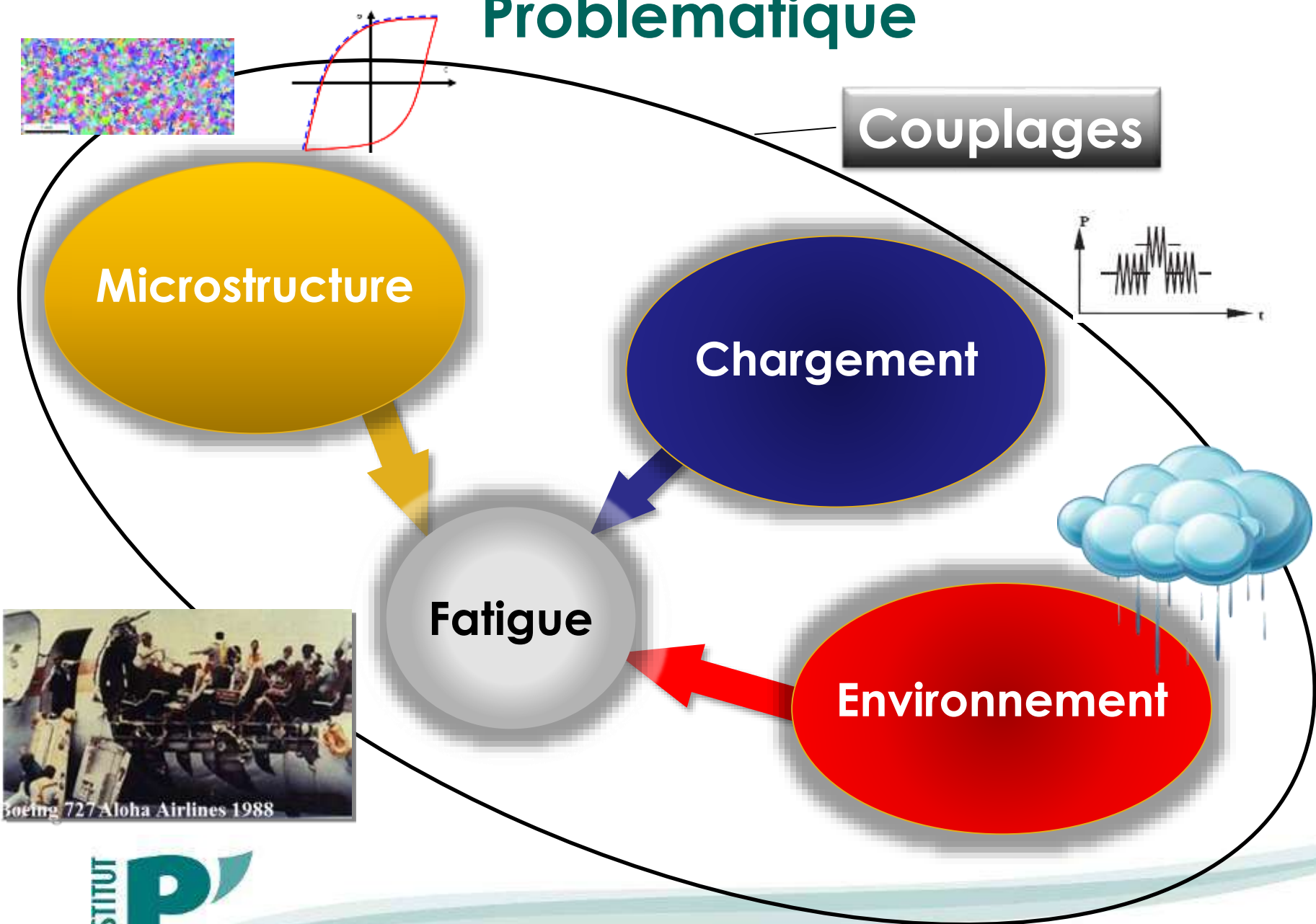


**Jean Petit**  
**(1943-2015)**



**Robert P. Wei**  
**(1931-2015)**

# Problématique



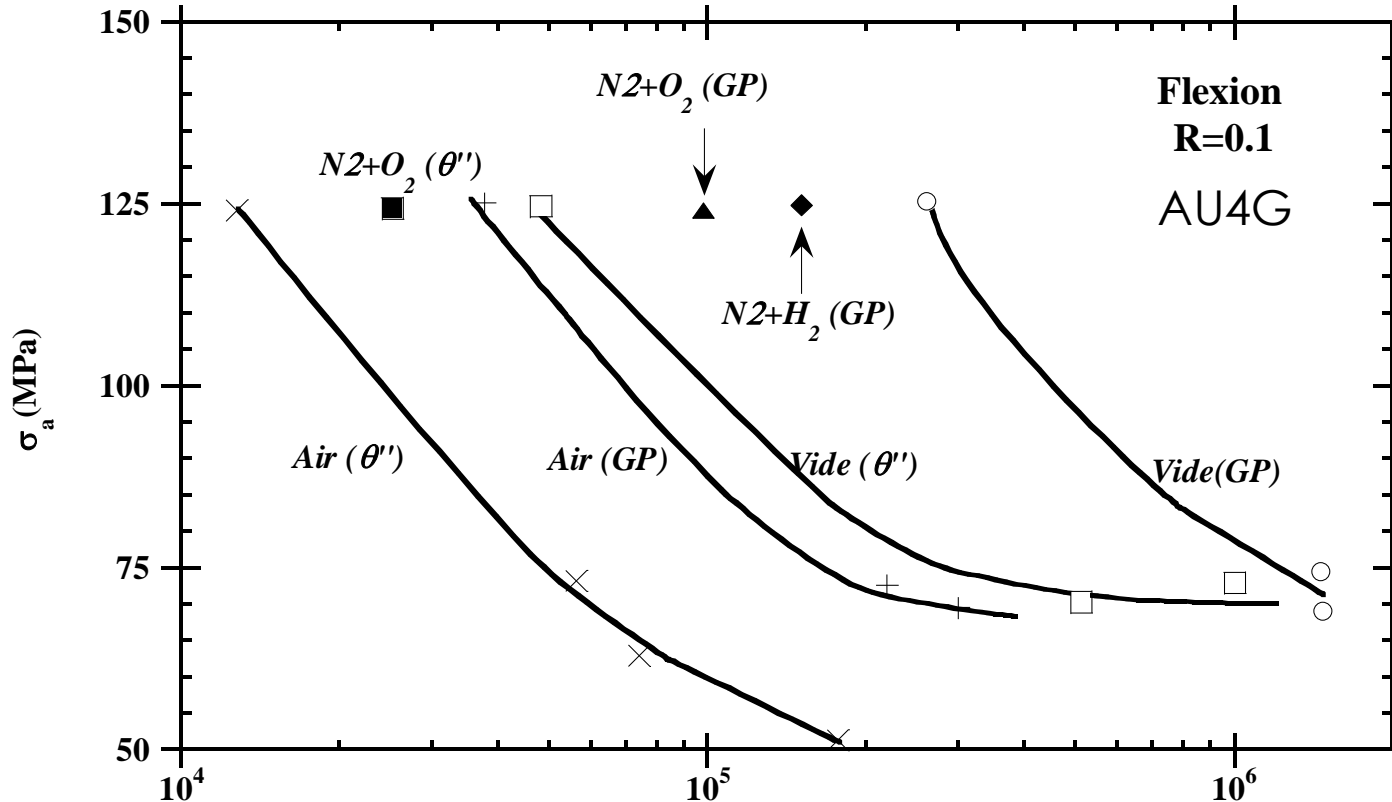
# Contours de l'exposé

- Différentes manifestations de l'effet d'environnement à l'air ambiant
- D'où nécessité d'identifier la résistance à la fissuration intrinsèque
- →Analyse de l'effet d'environnement « Air ambiant »
- Nouvelles voies d'investigation et de modélisation: propagation sous haute pression d'hydrogène gazeux

Contexte (pour l'essentiel):

- Alliages métalliques
- Plasticité confinée
- Atmosphères gazeuses
- Fissures longues en mode I stade II
- Propagation corrigée des éventuels effets de fermeture
- Température ambiante

# Influence du milieu environnant sur la tenue en fatigue



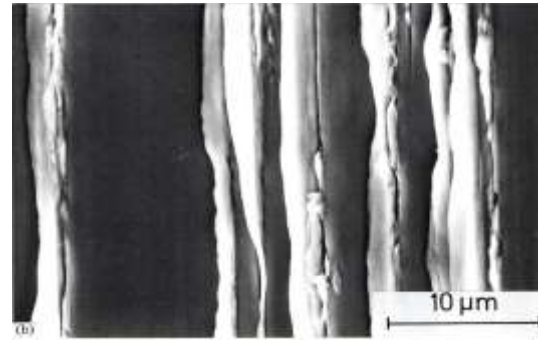
→ Effet de l'air sur l'amorçage ou la propagation?

B. Bouchet, J. de Fouquet, and M. Aguilon, Influence de l'environnement sur les facies de rupture par fatigue d'éprouvettes monocristallines et polycristallines d'alliage Al-Cu 4%, Acta Met, 23 (1975) 1325-1336.

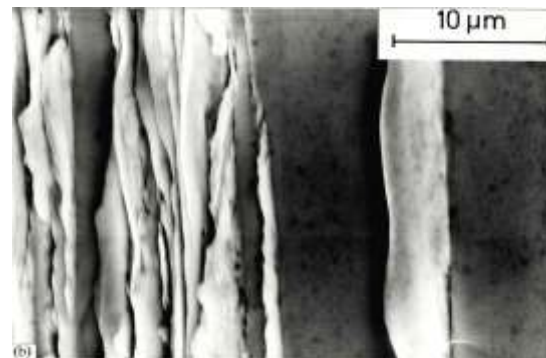
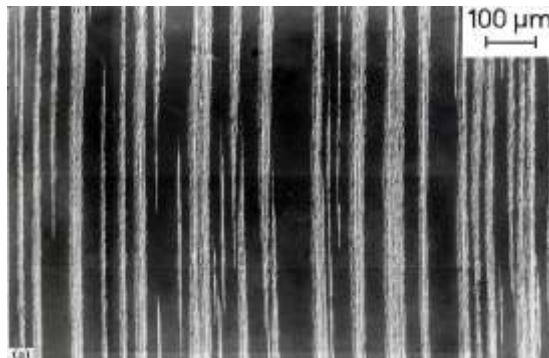
# Influence de l'environnement sur les déformations de surface

## Monocristal de cuivre

Air

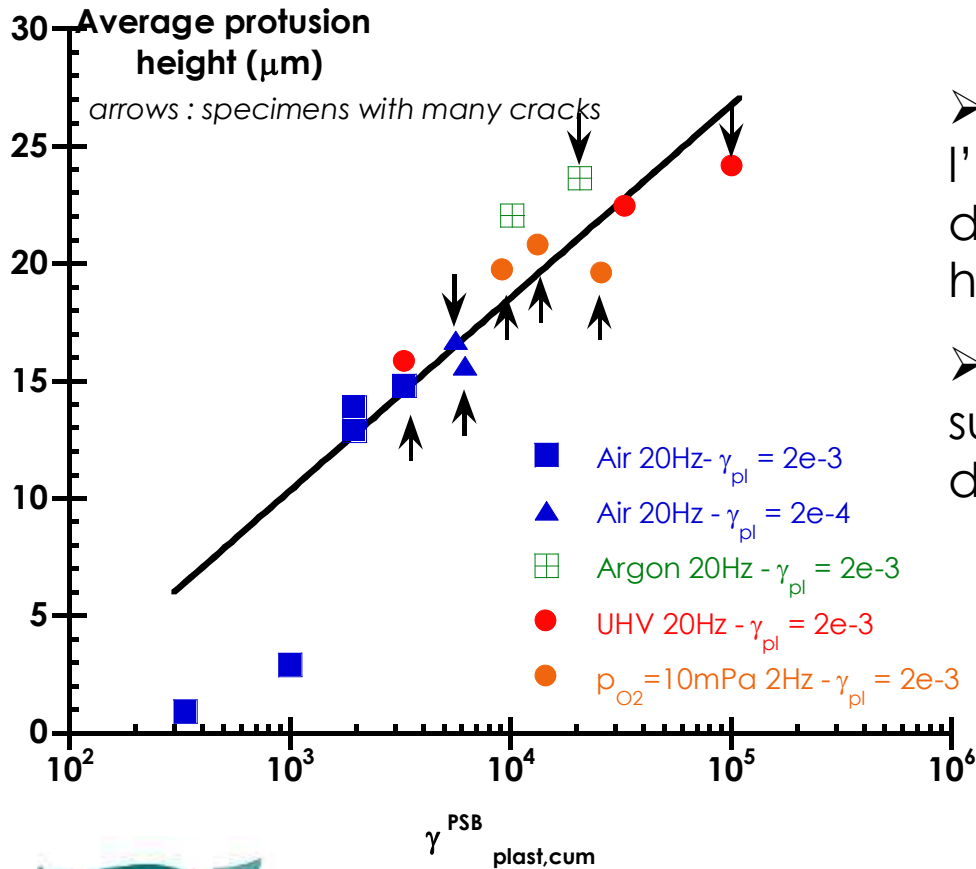


Vide



→ Pas de différence significative pour une valeur donnée de la déformation plastique cumulée

# Influence de l'environnement sur la déformation en surface



- Pas d'influence de l'environnement sur la formation d'extrusions (cinétique, hauteur,...)
- Influence de l'environnement sur l'amorçage et la croissance des microfissures

A. Hunsche and P. Neumann In *Basic Questions in Fatigue*, ASTM STP 924, Ed. Wei, R. P. and Gangloff, R. P., ASTM, Philadelphia, 1988, pp. 26-38.

# Intérêt des essais sous vide: compréhension des mécanismes

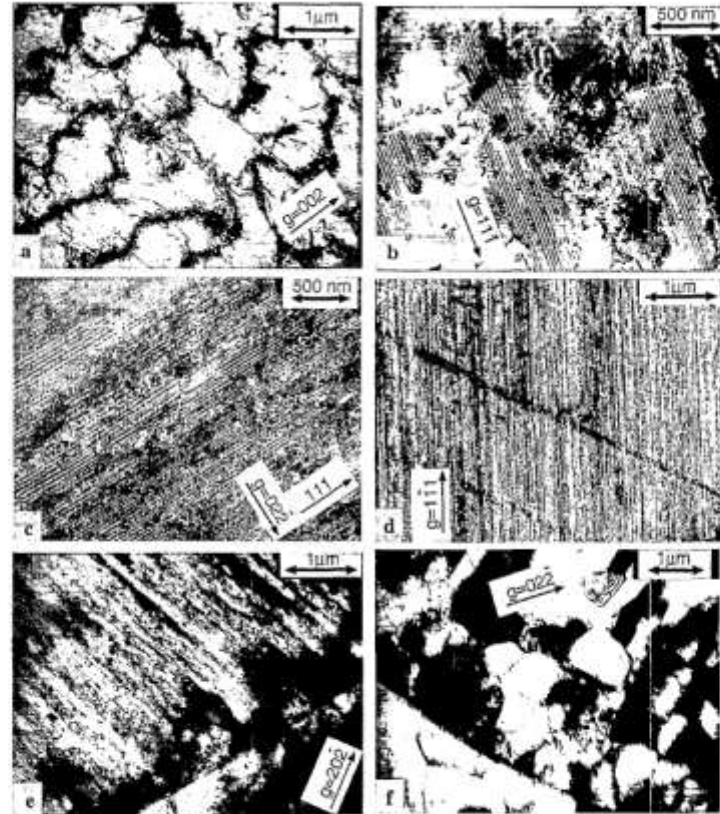
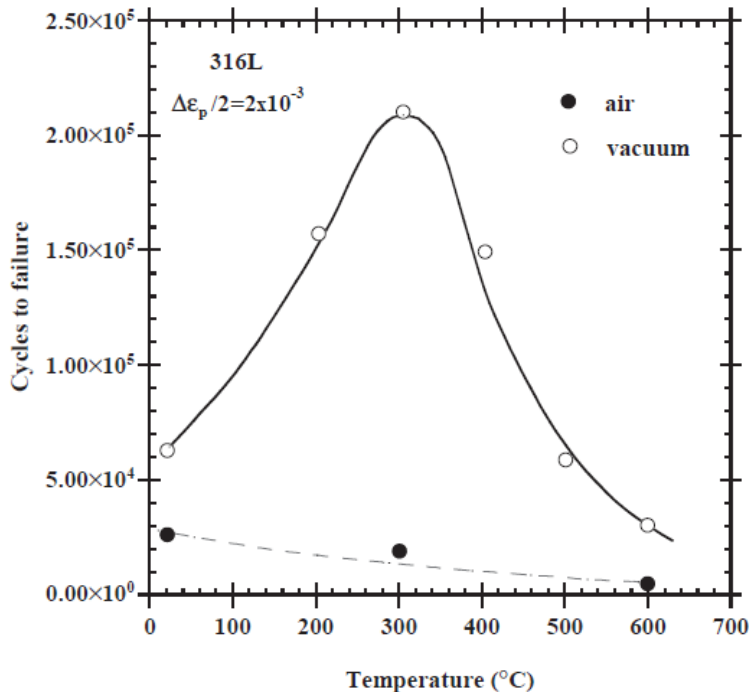


Fig. 2. Examples of dislocation structures at failure in vacuum for the plastic strain amplitude  $\Delta\epsilon_p/2 = 2 \times 10^{-3}$ : (a) 20°C, cells; (b) 200°C, formation of the corduroy contrast; (c) 300°C, corduroy contrast; (d) 400°C, generalized corduroy structure; (e) 500°C, dislocation alignments and cells near a boundary; (f) 600°C, disorientated cells.

R. Alain, P. Violan, J. Mendez, Low cycle fatigue behavior in vacuum of a 316L type austenitic stainless steel between 20 and 600[deg]C. Part I: Fatigue resistance and cyclic behavior, Materials Science and Engineering A, 229 (1997) 87-94.

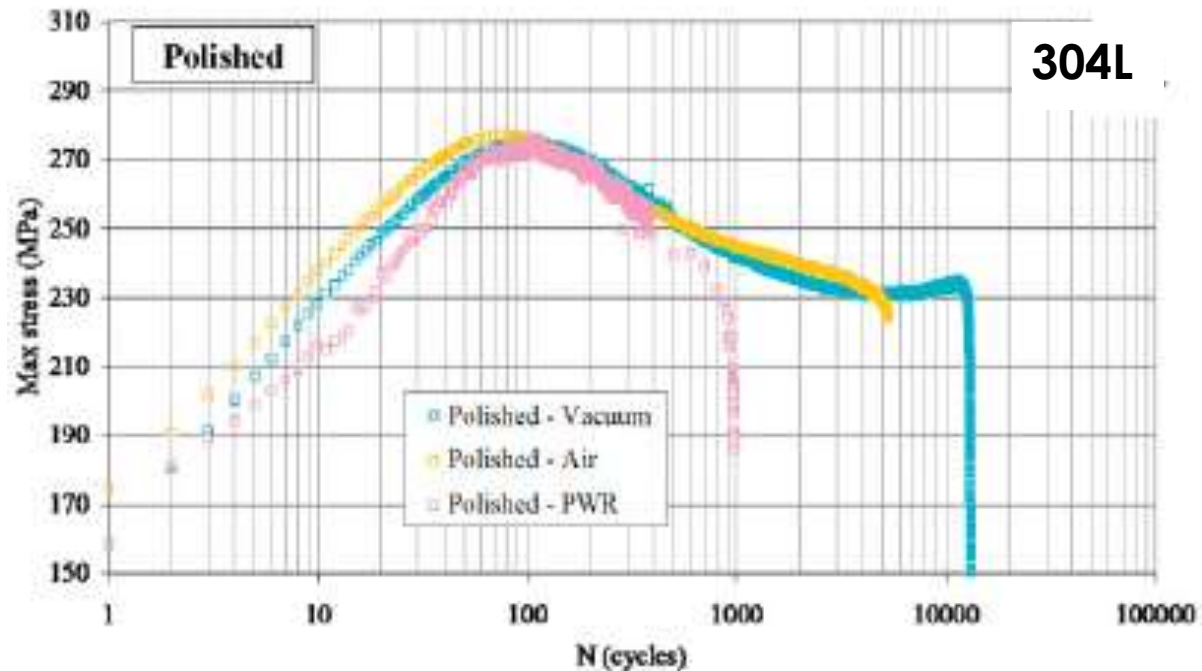
R. Alain, P. Violan, J. Mendez, Low cycle fatigue behavior in vacuum of a 316L type austenitic stainless steel between 20 and 600°C Part I: Fatigue resistance and cyclic behavior, Materials Science and Engineering: A, 229 (1997) 87-94.



# Influence de l'environnement en fatigue oligocyclique

$$\Delta\varepsilon_t/2 = +/- 0.6\%$$

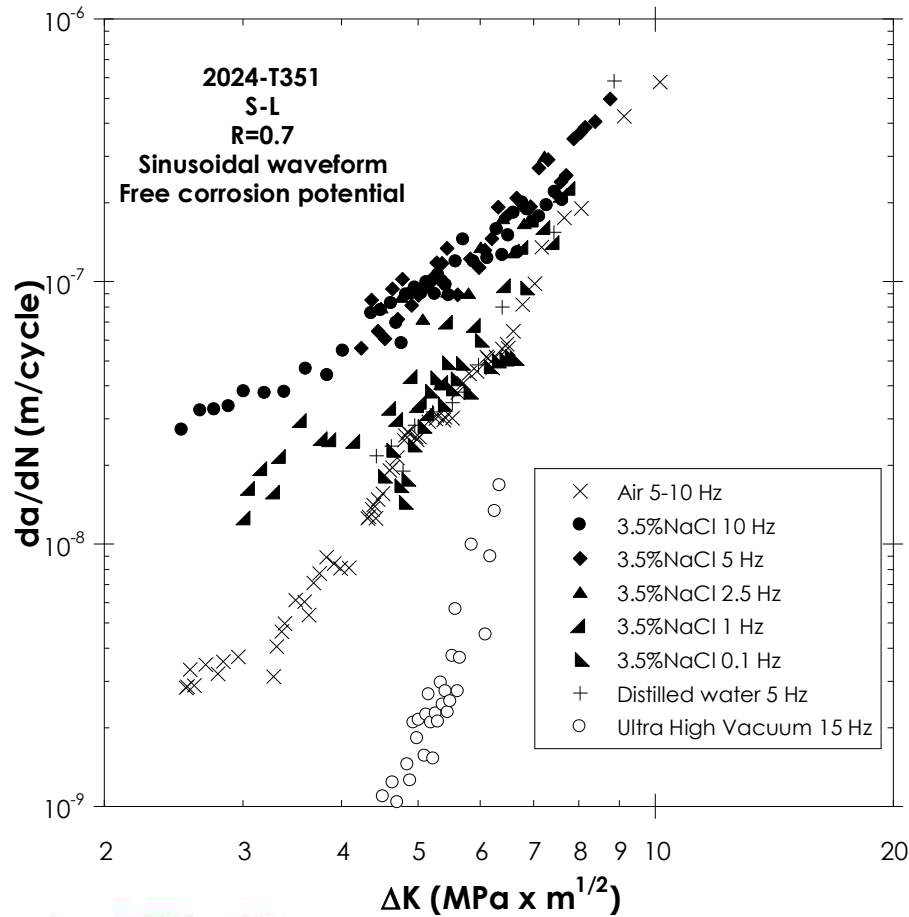
$$\dot{\varepsilon} = 10^{-4} s^{-1}$$



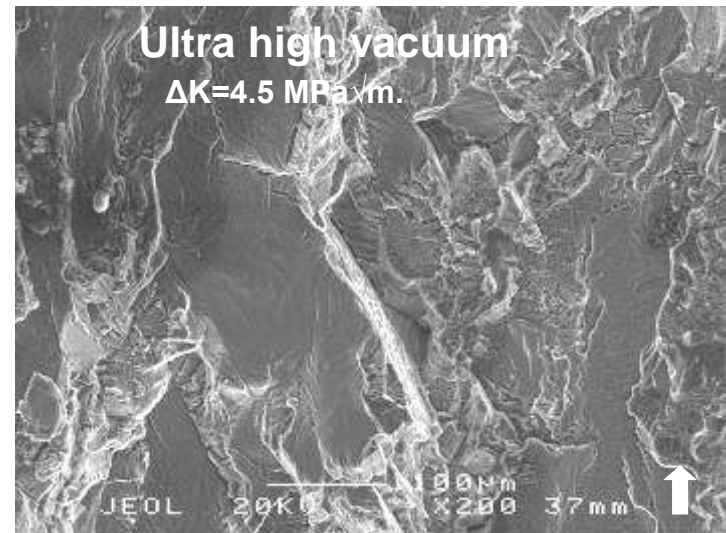
Pertinence du choix de l'air comme environnement de référence dans le dimensionnement?

T. Poulain, J. Mendez, G. Henaff, L. de Baglion, Influence of Surface Finish in Fatigue Design of Nuclear Power Plant Components, Procedia Engineering, 66 (2013) 233-239.

# Action de l'air atmosphérique/milieu corrosif



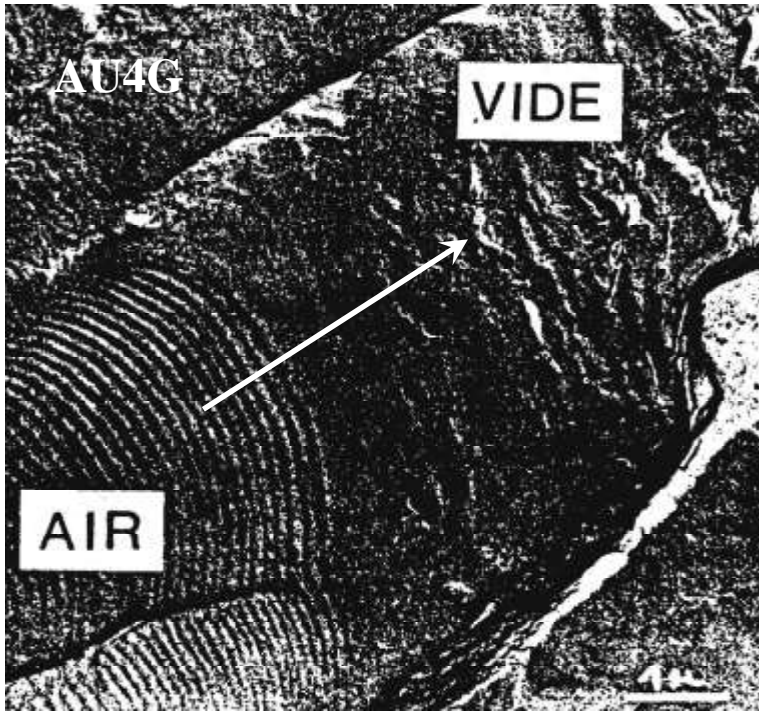
L'air est un milieu actif en fissuration par fatigue, souvent aussi agressif que d'autres milieux supposés corrosifs.



F. Menan and G. Hénaff, Influence of frequency and exposure to a saline solution on the corrosion fatigue crack growth behavior of the aluminum alloy 2024, *International Journal of Fatigue*, 31 (2009) 1684-1695.

G. Hénaff – MECAMAT Aussois 2017 : Fatigue des structures et des matériaux

# Influence de l'environnement sur les mécanismes de fissuration par fatigue



Bouchet, B, Influence de l'environnement sur le comportement en fatigue d'un alliage léger type AU4G, thèse, Université de Poitiers - UER ENSMA, 1976.

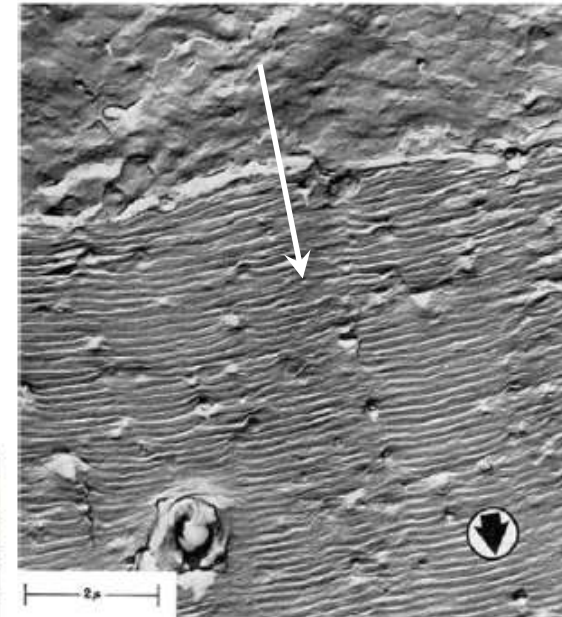
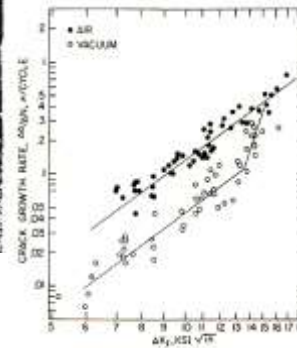
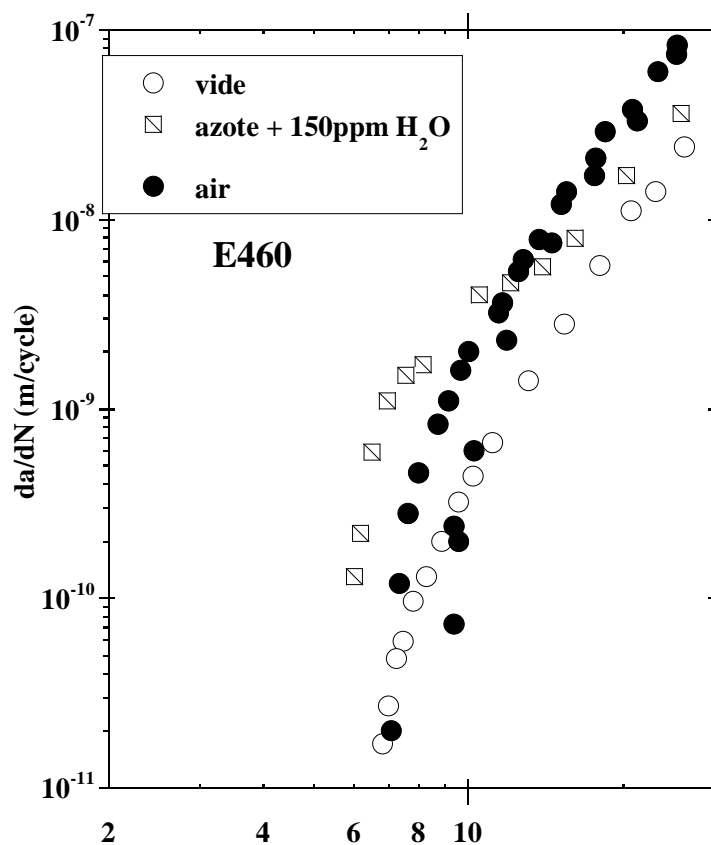


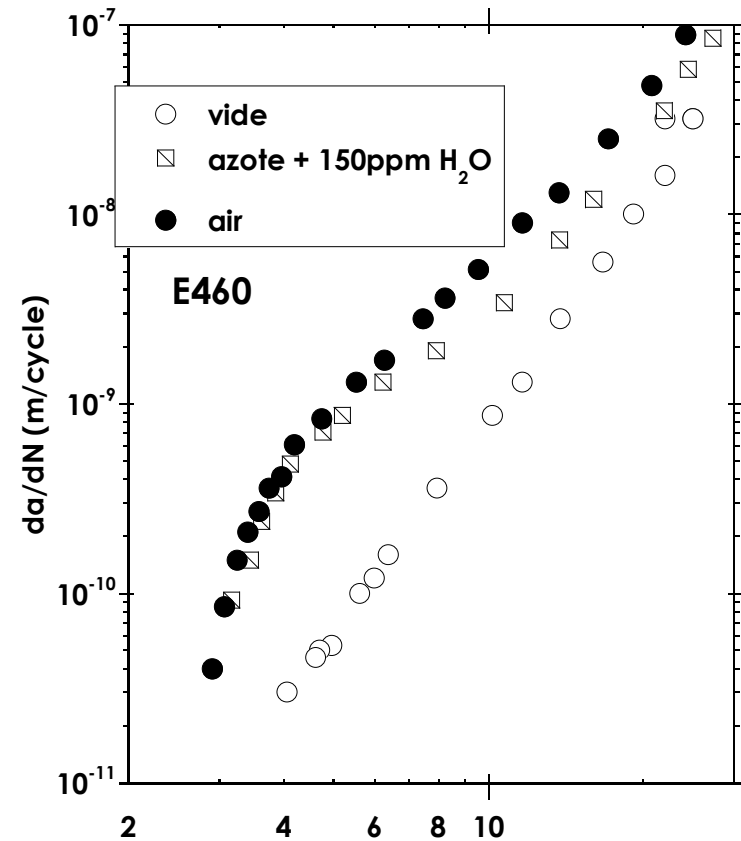
Figure 18 Electron micrograph showing the fracture surface of 2024-T3 alloy tested in fatigue in vacuum (top) and in air (bottom). The arrow points in the direction of crack propagation (source Meyn, 1968). Reproduced with permission from ASM International.

→ Absence de strie sous vide

# Influence du rapport de charge: fermeture induite par l'oxyde



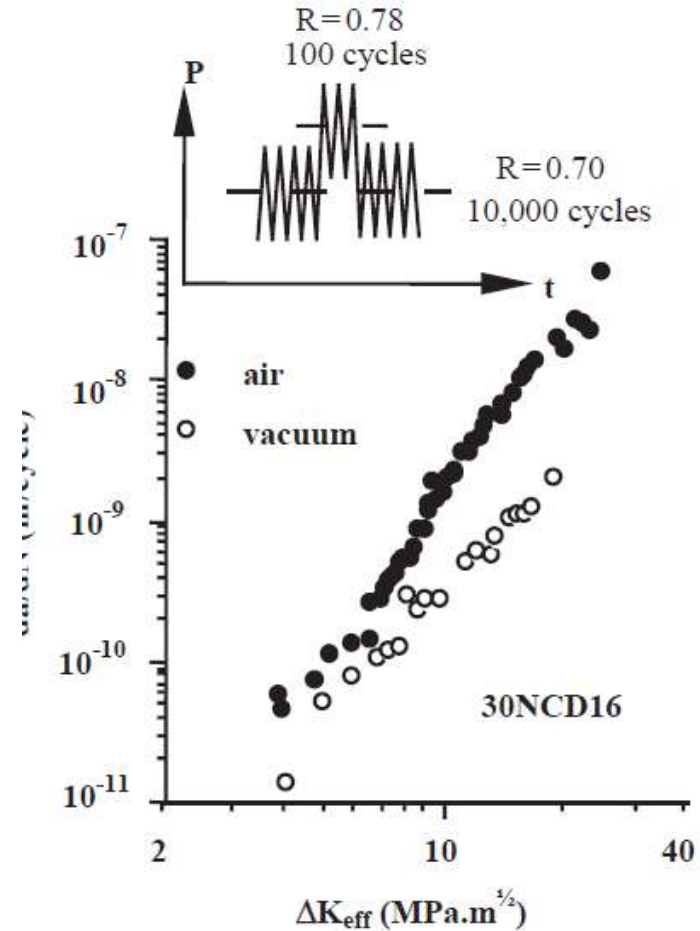
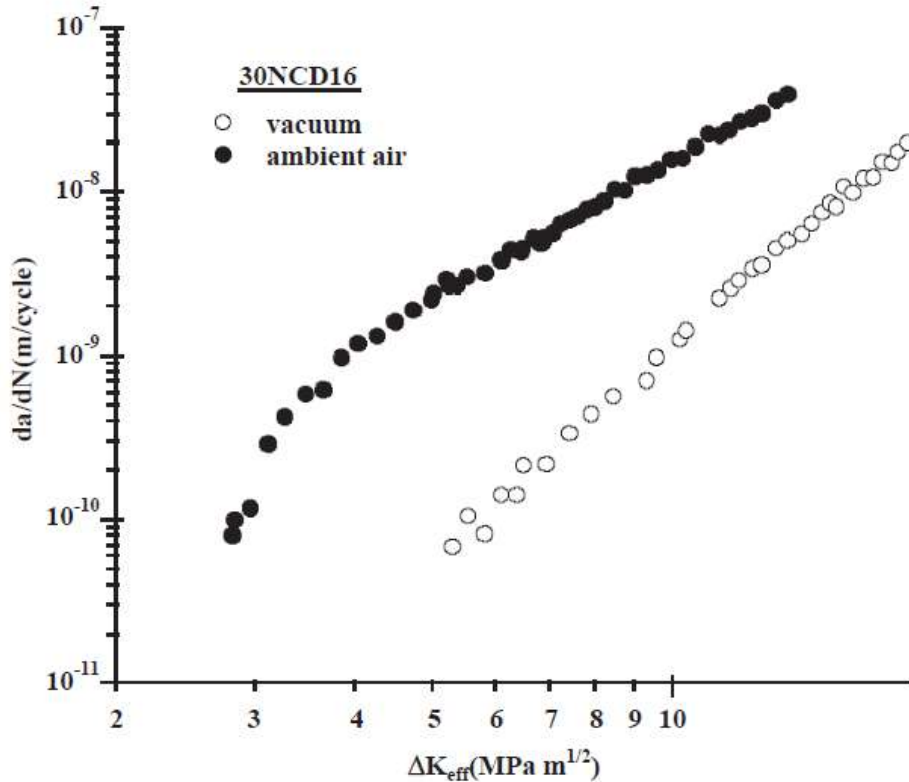
$\Delta K$  (MPa.m<sup>1/2</sup>)



$\Delta K_{eff}$  (MPa.m<sup>1/2</sup>)

A. Bignonnet, D. Loison, N. Namdar Irani, B. Bouchet, J. H. Kwon, and J. Petit, Environmental and frequency effects on near-thresholds fatigue crack propagation in a structural steel, in D. L. Davidson and S. Suresh Editeur, Fatigue Crack Growth Thresholds Concepts, Philadelphia, Pennsylvania, 1983, 99-113

# Interaction de l'environnement avec l'histoire de chargement



# Comportement intrinsèque

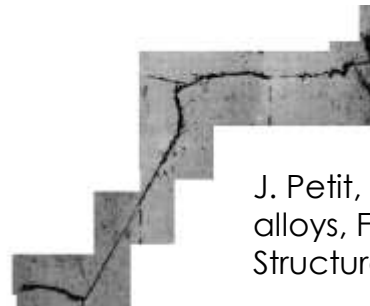
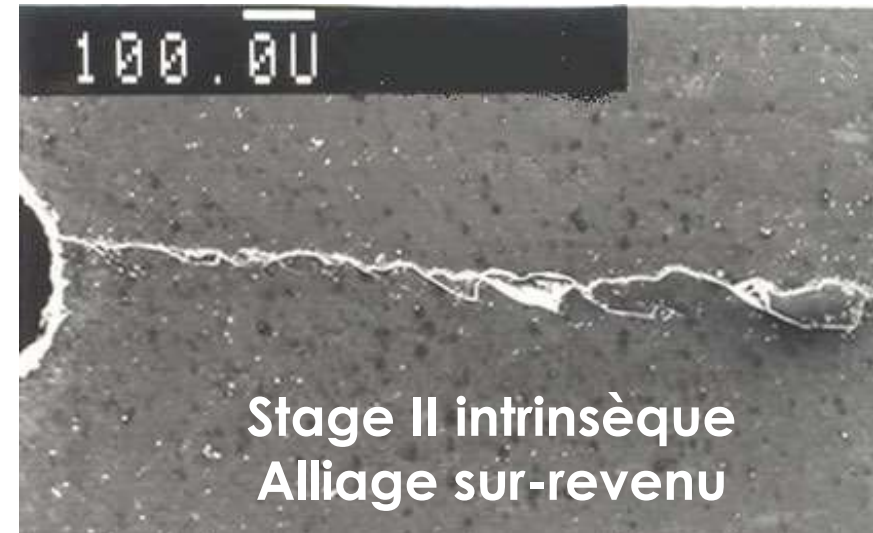
*(càd en l'absence d'effet d'environnement, corrigé des effets de fermeture)*

# Mécanismes élémentaires de propagation

Monocristaux Al-4.5% wt Zn-1.25% Mg

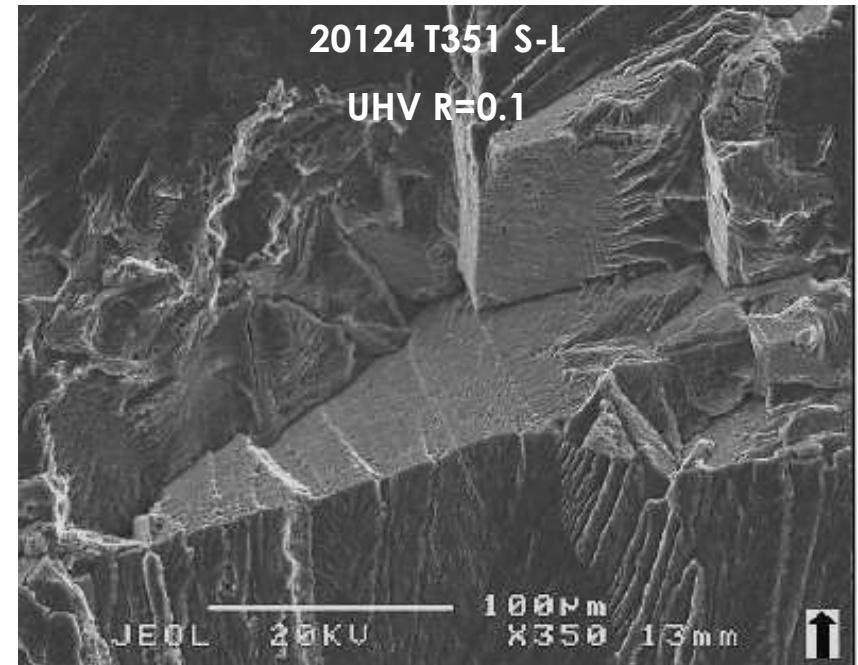
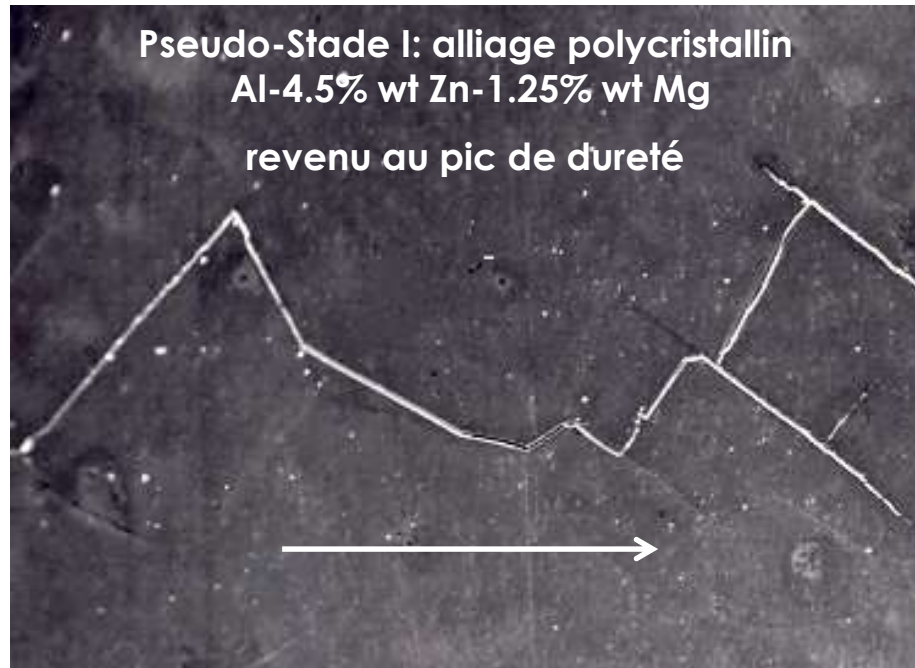
Préorienté pour glissement facile plan (111) à 45° C

(Vide secondaire, R=0.1, 35 Hz).



J. Petit, Near-threshold fatigue crack path in Al-Zn-Mg alloys, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 28 (2005) 149-158.

# Mécanismes élémentaires de propagation

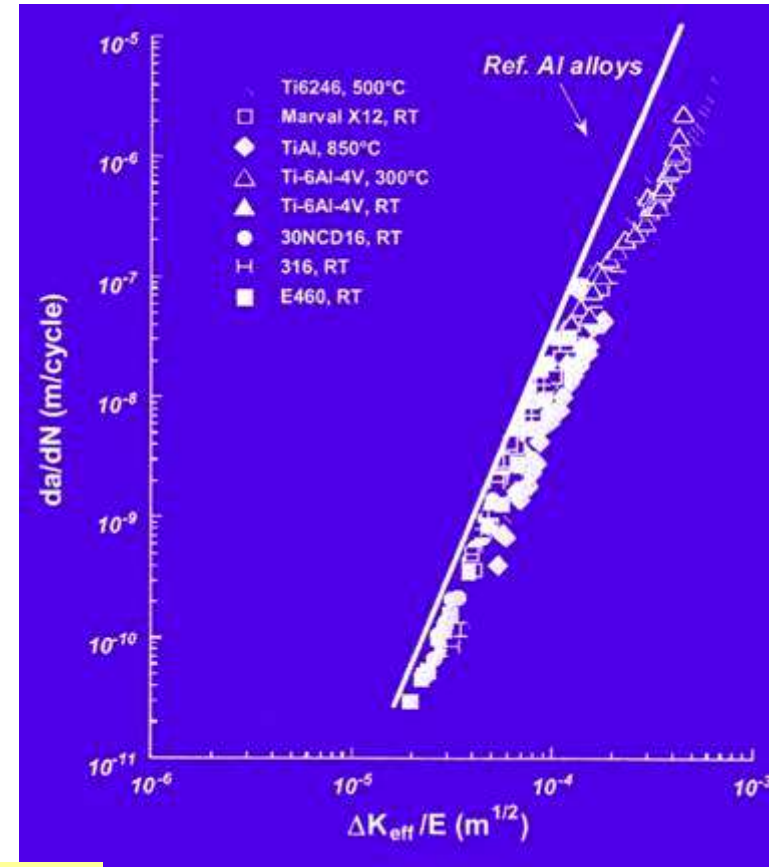
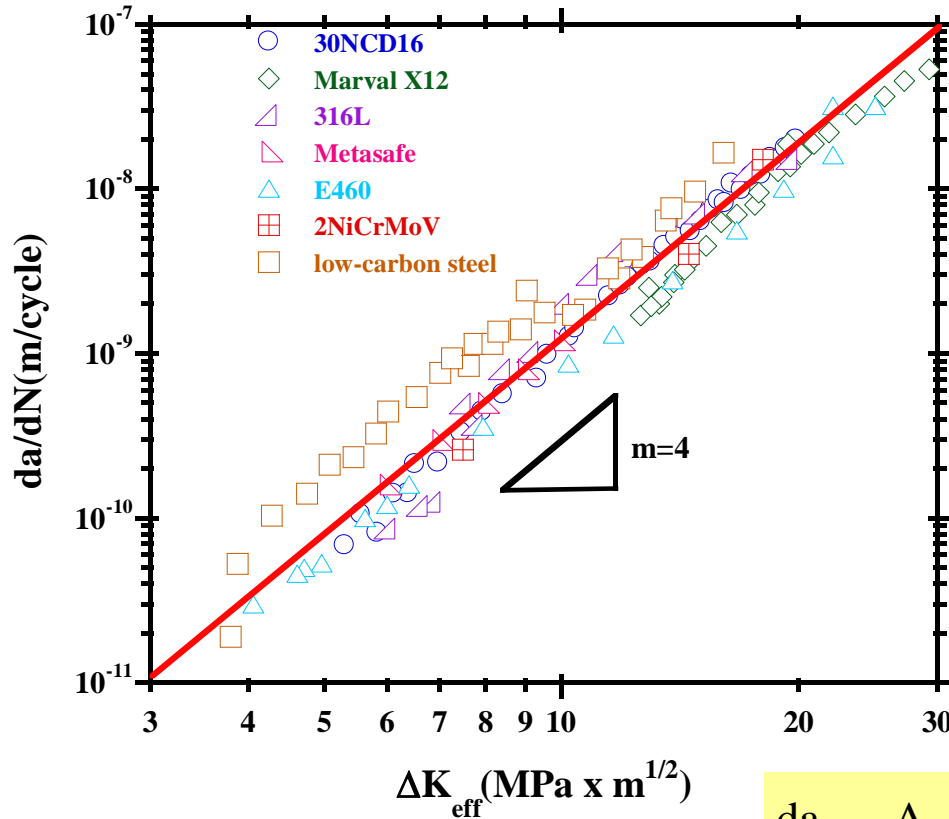


J. Petit, Near-threshold fatigue crack path in Al-Zn-Mg alloys, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 28 (2005) 149-158.

Thèse F. Menan, ENSMA, 2008

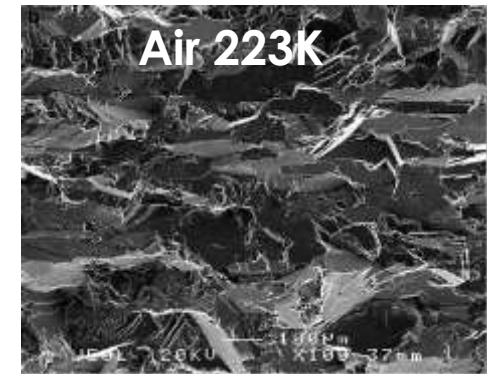
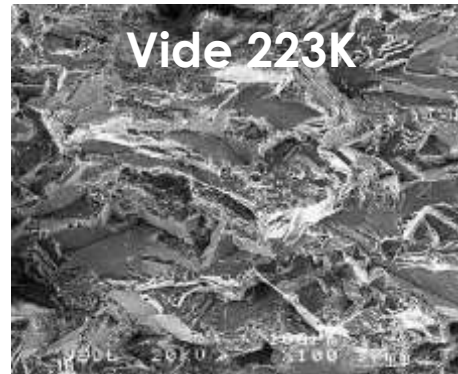
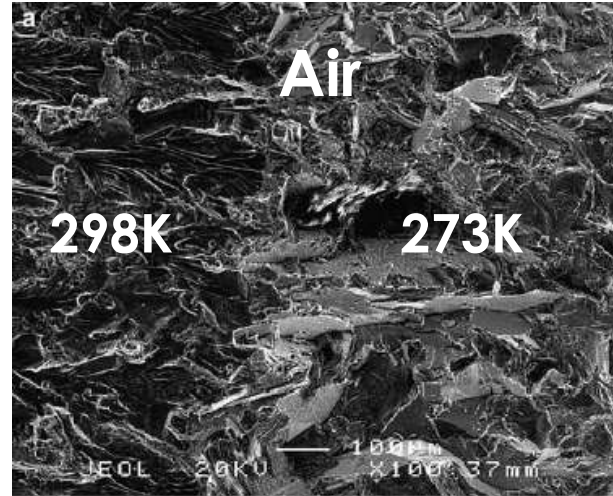
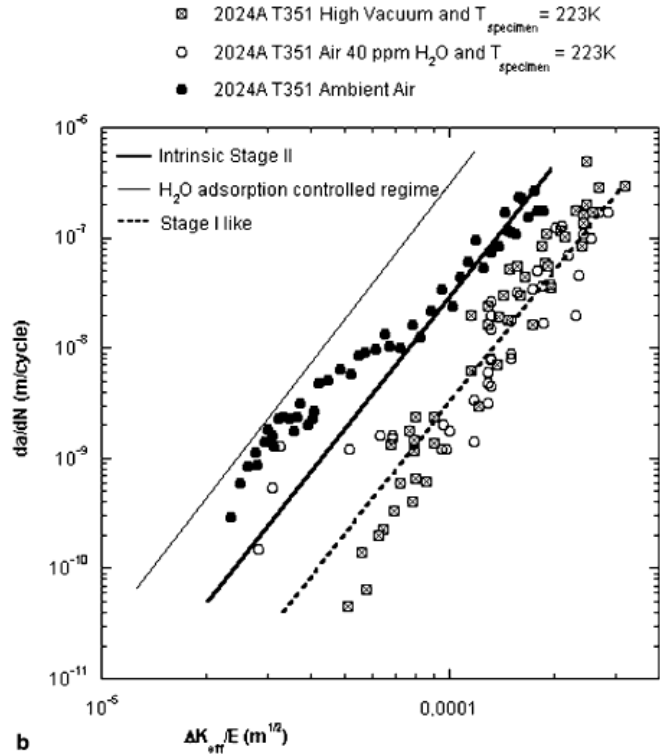


# Propagation intrinsèque en stade II



$$\frac{da}{dN} = \frac{A}{D_0^*} \times \left( \frac{\Delta K_{eff}}{E} \right)^4$$

# Effet de basses températures



C. Gasquères, C. Sarrazin-Baudoux, J. Petit, and D. Dumont, Fatigue crack propagation in an aluminium alloy at 223 K, *Scripta Materialia*, 2005; 53: 1333-1337.

# Analyse de l'action de l'air ambiant

# Fragilisation par l'hydrogène en pointe de fissure

## Transport

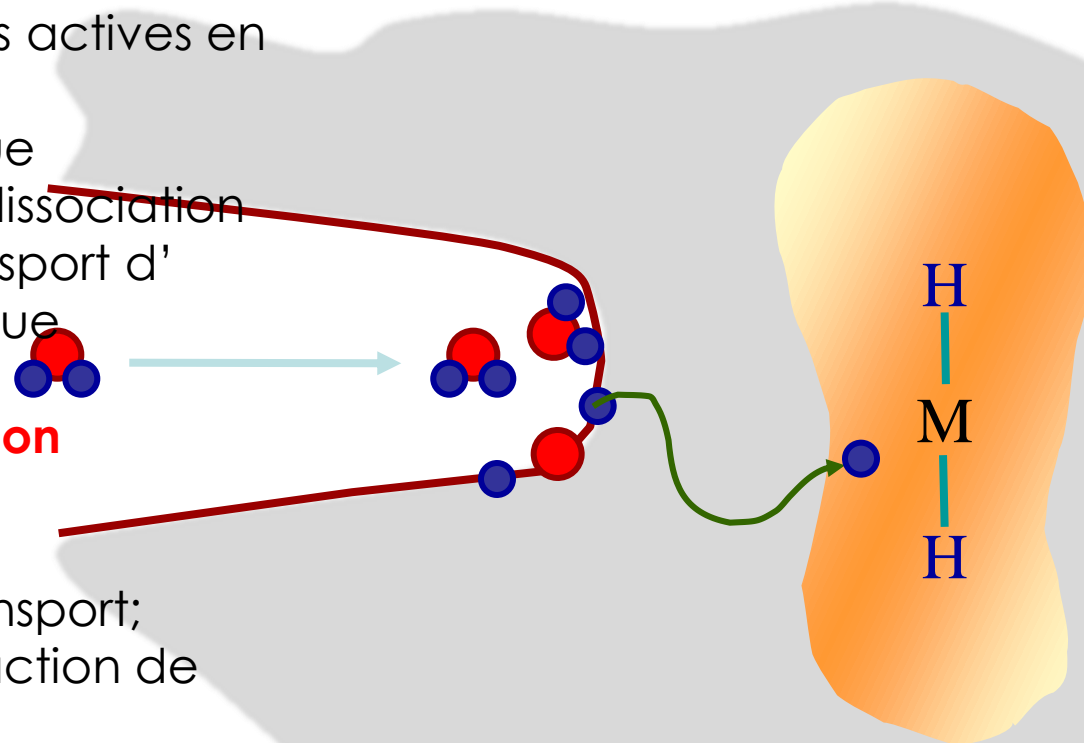
- Accès des espèces actives en pointe
- Adsorption physique
- Chemisorption et dissociation
- Pénétration et transport d'hydrogène atomique

## Réaction de fragilisation

### 2 cas extrêmes:

- Contrôlé par le transport;
- Contrôlé par la réaction de surface.

### Mais: 1 seul mécanisme

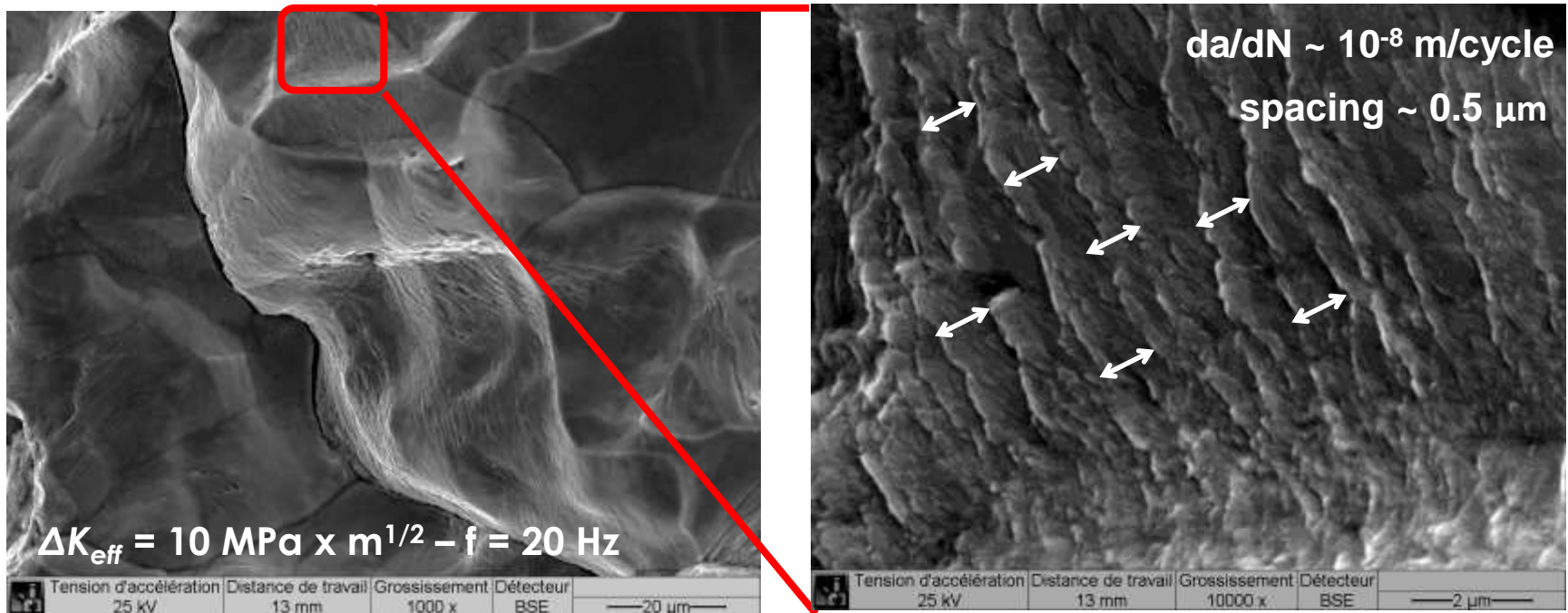


**Fragilisation**

# Théories « Fragilisation par l'hydrogène »

- **HEDE (Oriani):**
  - l'hydrogène agit ainsi sur les forces de cohésion interatomique. Proche de la théorie précédente sauf que l'on considère l'hydrogène absorbé
- **HELP (Beachem, Birnbaum, Robertson, Sofronis):**
  - L'hydrogène, en réduisant l'aire d'activation du mouvement des dislocations, faciliterait le mouvement des dislocations (Birnbaum)
  - L'hydrogène écran les interactions entre dislocations et/ou entre dislocations et obstacles,  $\Rightarrow$  localisation
  - l'hydrogène est un frein au glissement dévié, ce qui favorise le confinement des dislocations dans leur plan de glissement
  - En outre, le transport par les dislocations favorise la diffusion en volume le long des lignes de glissement
  - Propagation par cisaillement successif le long des plans de cisaillement
- **AIDE (Lynch):**
  - L'hydrogène adsorbé favorise l'émission de dislocations supplémentaires suivant 2 plans symétriques
  - A l'activation du glissement assisté par l'hydrogène vient s'ajouter la coalescence de microcavités en avant de la pointe
  - La propagation se fait suivant le plan bissecteur des plans de glissement
  - La diffusion ou le transport de l'hydrogène ne sont pas essentiels: l'hydrogène adsorbé réduit l'érouement

# Fissuration sous hydrogène gazeux Fer ARMCO



# Adsorption-assisted model

Basic FCP law :

$$\frac{da}{dN} = \frac{A}{D^*} \left( \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{E} \right)^4$$

$D^*$  is related to the coverage rate  $\theta$  :

$$D^* = \frac{D_0^* D_1^*}{D_1^* + \theta(D_0^* - D_1^*)}$$

$\theta=0$  : no adsorption

$\theta=1$  : saturating adsorption

*Hénaff, G, Marchal, K and Petit, J, 1995. On Fatigue Crack Propagation Enhancement by a Gaseous Atmosphere: Experimental and Theoretical Aspects. Acta Metall et Mater 43 (8), 2931-2942.*

# Adsorption-assisted model: adsorption kinetics & coverage rate

Accounts for competition between:

- Access of active species at the crack tip;
- Adsorption kinetics;
- Crack growth rates induced by damage.

$$A \times \theta - B \times \ln(1 - \theta) = Ct \quad \text{with} \quad A = \frac{\alpha S_0}{4F} \quad B' = \frac{1}{N_s v_a} \quad C = \frac{p_0}{4N_0 kT}$$

- $\alpha$  : rugosity coefficient;
- $S_0$  : geometrical surface ( $\alpha S_0$  : physical surface);
- $F$  : crack impedance;
- $N_s$  : number of cycles with a stationary crack front;
- $v_a$  : mean molecular speed;
- $p_0$  : water vapour partial pressure;
- $N_0$  : number of adsorption sites per area unit;

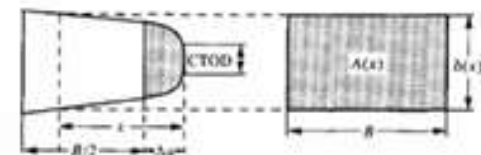
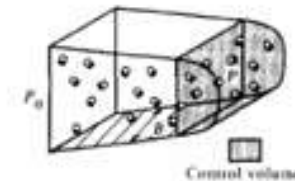
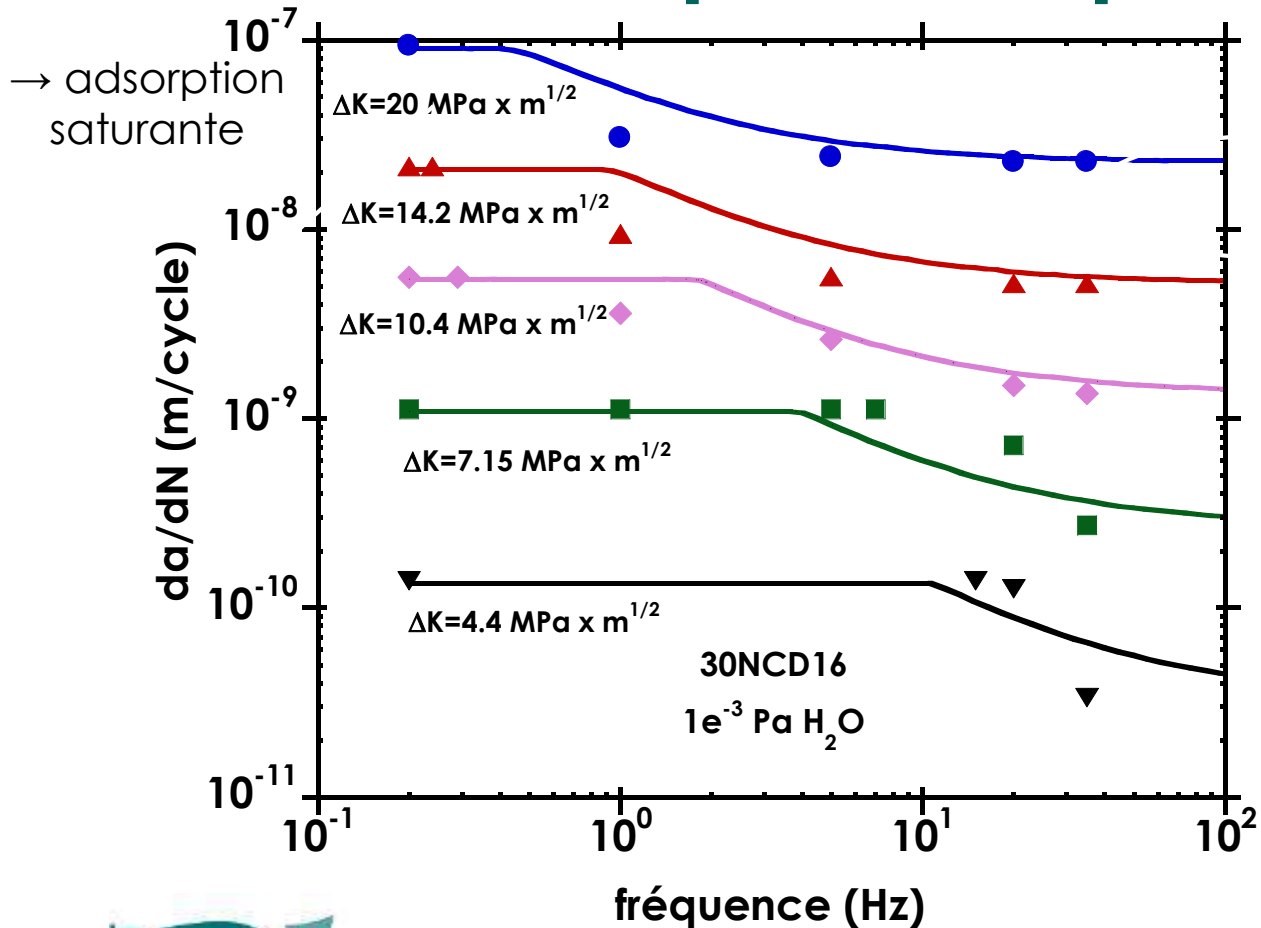


Fig. 3. Geometrical definition of the crack impedance effect.



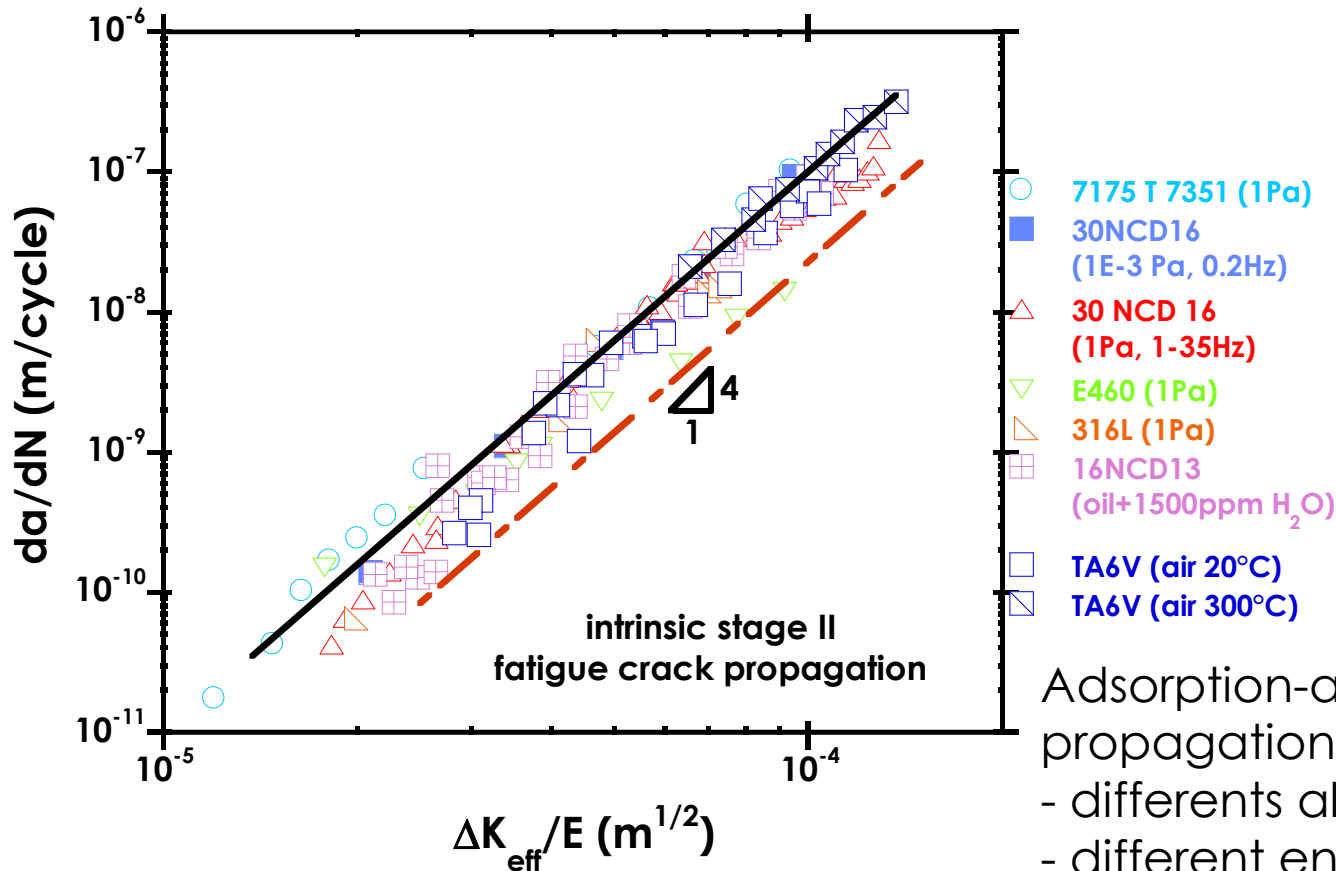
# Influence de la fréquence sous très faible pression partielle



Traits continus  $\Leftrightarrow$  loi de propagation intégrant les cinétiques d'adsorption

⇒ Nécessité de travailler sous Ultra-Vide

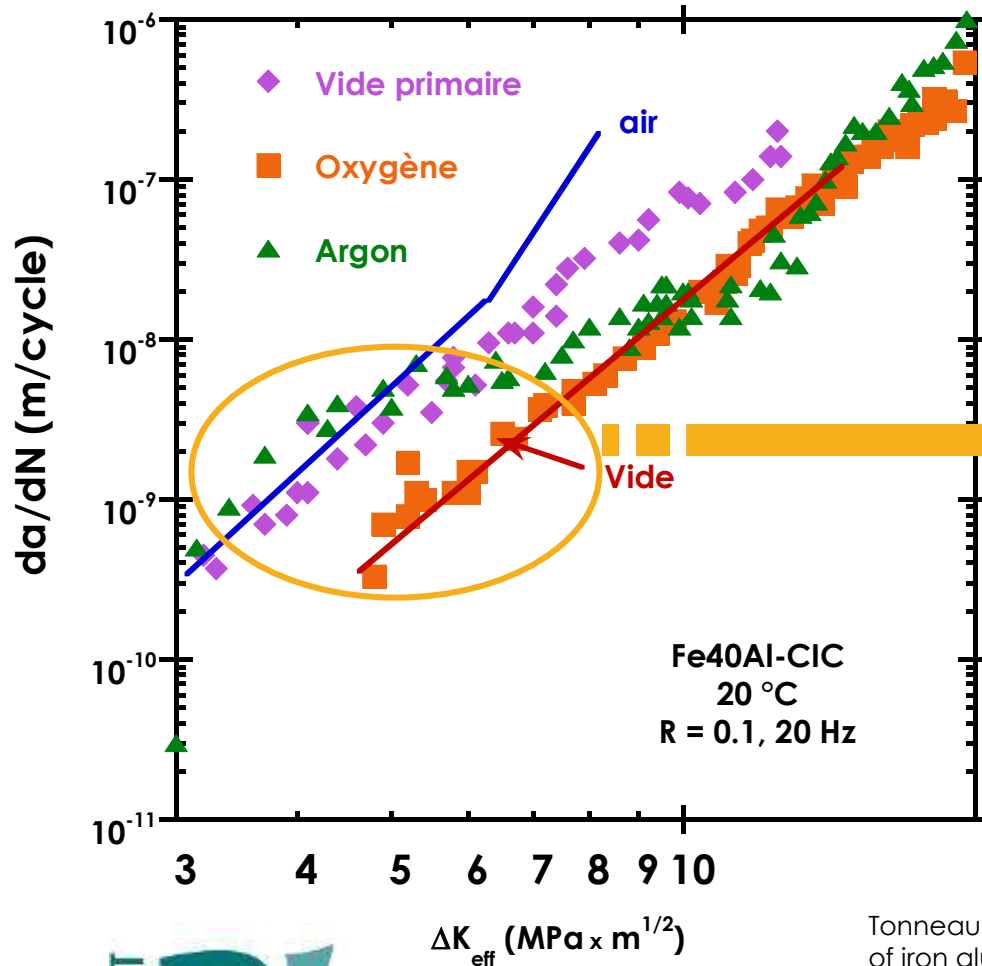
# Adsorption-assisted fatigue crack propagation



Adsorption-assisted fatigue crack propagation:

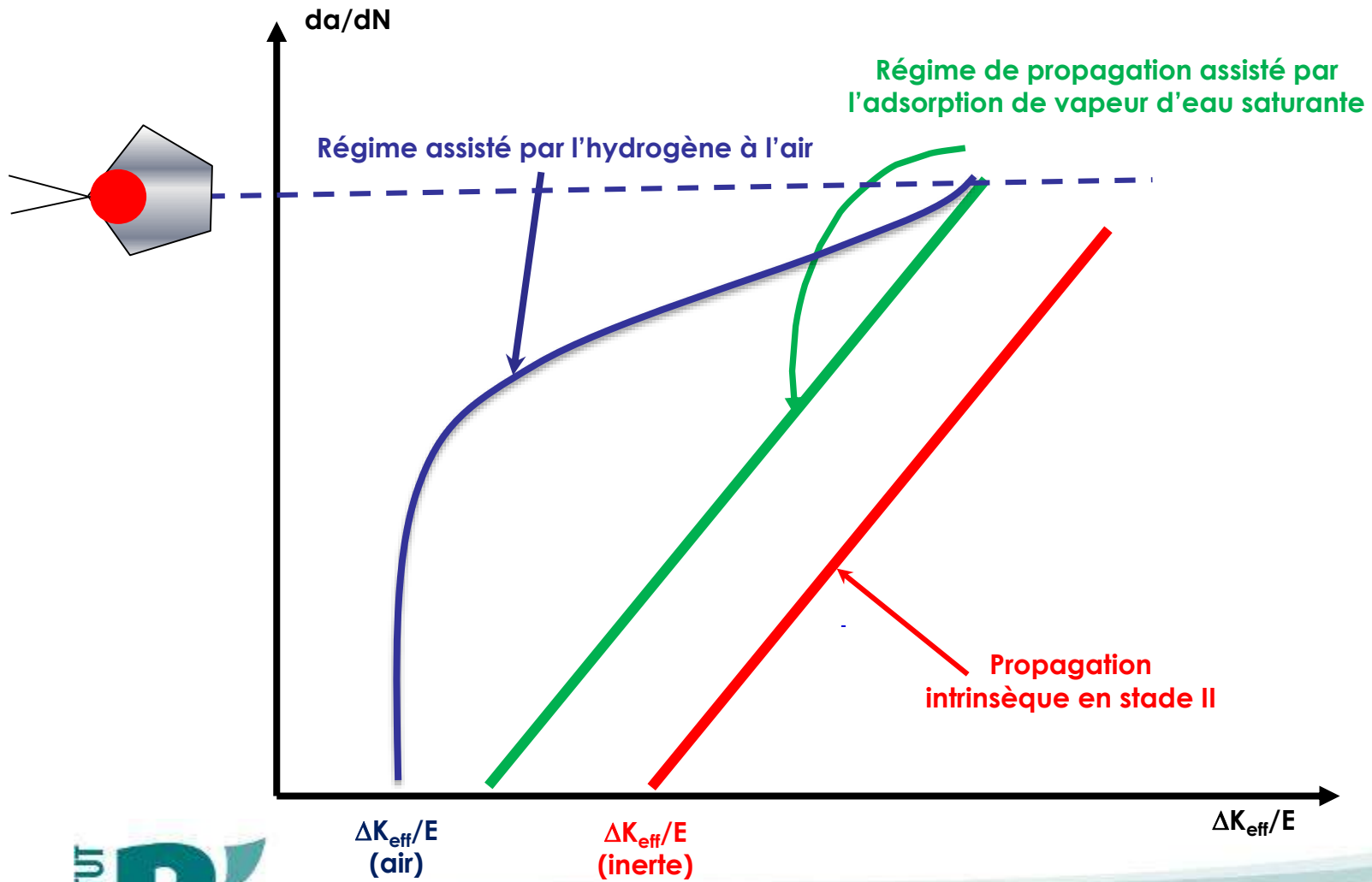
- different alloys;
- different environmental conditions.

# Adsorption compétitive



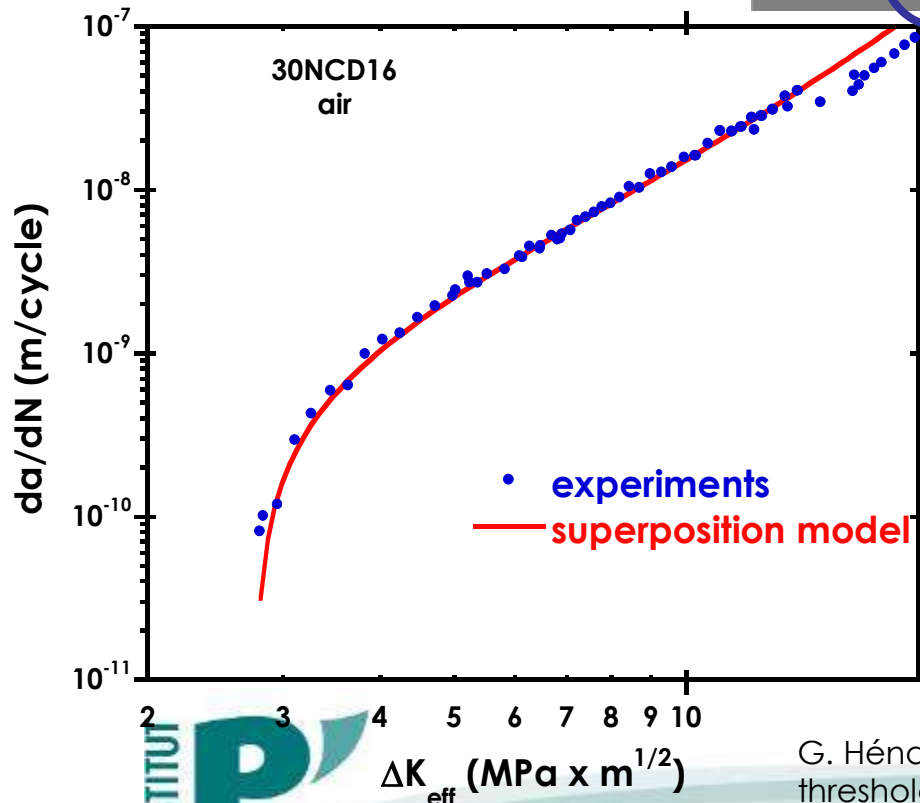
Comparaison Ar/O<sub>2</sub> (même teneur en H<sub>2</sub>O) : l'oxygène inhibe l'action de la vapeur d'eau ⇒ mêmes vitesses de propagation que sous vide

# Analyse



# Modèle de superposition

$$\frac{da}{dN} = \frac{A}{D_1^*} \left( \frac{\Delta K_{\text{eff}}}{E} \right)^4 + \frac{B}{\sigma E} \left( \Delta K_{\text{eff}}^2 - \Delta K_{\text{eff,seuil}}^2 \right)$$

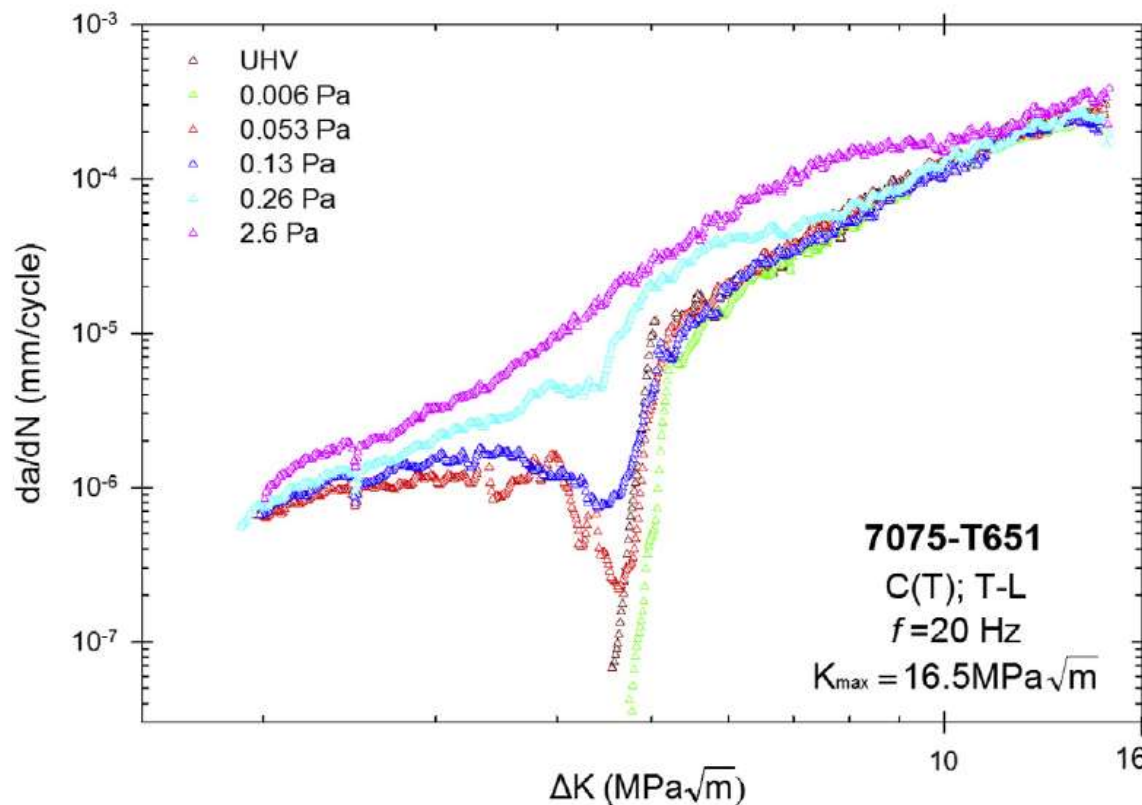


Adsorption

Hydrogène

G. Hénaff, J. Petit, B. Bouchet, Environmental influence on the near-threshold fatigue crack propagation behaviour of a high-strength steel, *Int. J. Fatigue*, 14 (1992) 211-218.

# Réactivation de l'effet d'environnement au voisinage du seuil sous très faible pression partielle

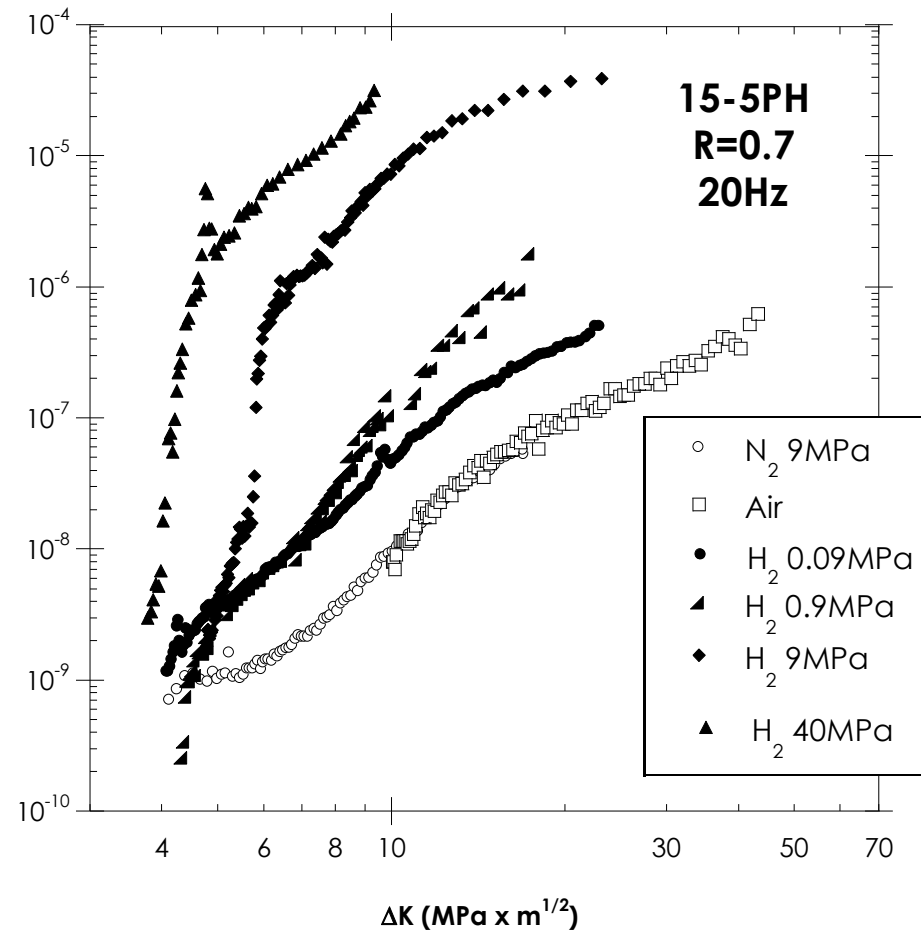
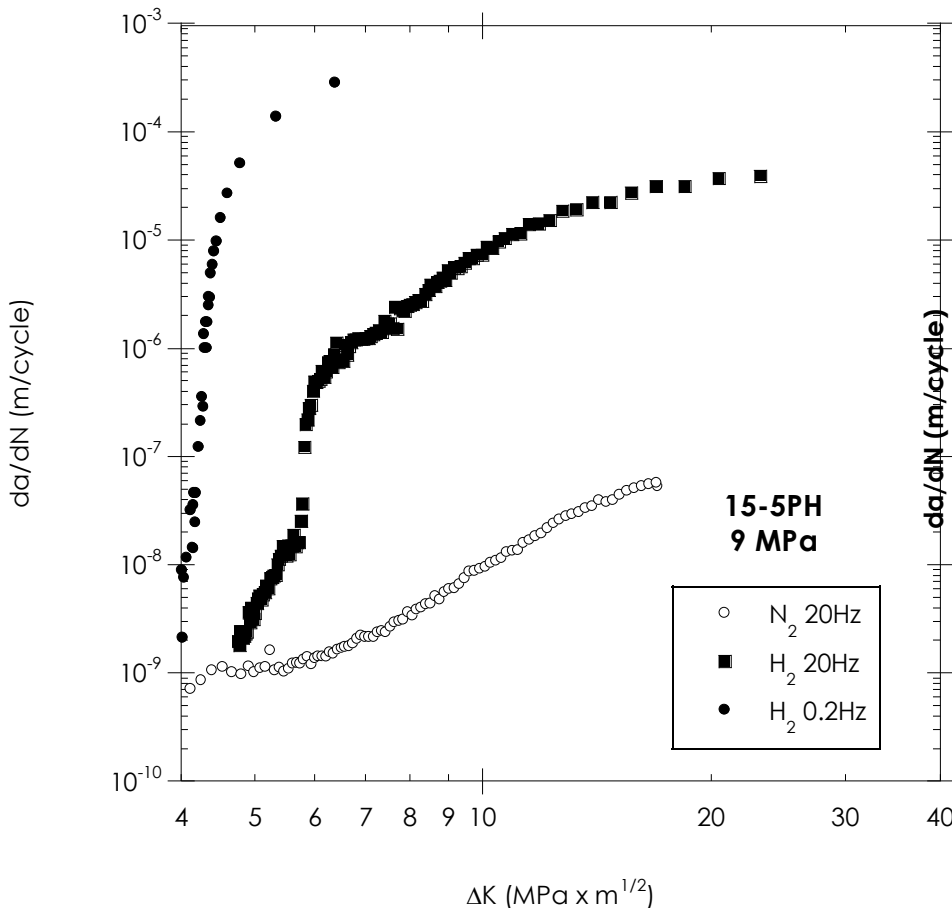


Interprétation: le déclenchement d'un régime d'écoulement mixte « turbulent/convectif » induit par la rugosité propre au mode pseudo-stade I réactive les effets « hydrogène » en pointe de fissure

J.T. Burns, R.W. Bush, J.H. Ai, J.L. Jones, Y. Lee, R.P. Gangloff, Effect of water vapor pressure on fatigue crack growth in Al-Zn-Cu-Mg over wide-range stress intensity factor loading, Engineering Fracture Mechanics, 137 (2015) 34-55.

# Propagation sous haute pression d'hydrogène gazeux

# Propagation sous hydrogène gazeux: Influence de la fréquence et de la pression



[Z. Sun, C. Moriconi, G. Benoit, D. Halm, and G. Hénaff, Fatigue Crack Growth under High Pressure of Gaseous Hydrogen in a 15-5PH Martensitic Stainless Steel: Influence of Pressure and Loading Frequency, *Metallurgical and Materials A*, 2013; 44A: 1320-1330.

C. Moriconi, M. Arzaghi, G. Benoit, D. Halm, Z. Sun, G. Hénaff, FATIGUE CRACK GROWTH UNDER HIGH PRESSURE OF GASEOUS HYDROGEN: EXPERIMENTS AND MODELING, in: B.P. Somerday, P. Sofronis (Eds.) 2012 International Hydrogen Conference, ASME, Jackson Lake, Moran, Wyoming, 2012.

G. Hénaff – MECAMAT Aussois 2017 : Fatigue des structures et des matériaux



# Model Formulation

- In the 2D approach, the damage at the interface is described by a Traction-Separation Law (**TSL**) which has to be:
  - Developed within the framework of the Thermodynamics of Irreversible Processes;
  - Flexible with respect to mechanical loading (Static, monotonic and cyclic);
  - Influenced by the presence of dissolved hydrogen.
- Formulation: thermodynamical potential  $\varphi$

$$\varphi = \frac{1}{2} k_n (1 - D) \frac{\langle \delta_n \rangle^2}{\delta_0} + \frac{1}{2} k_{comp} \frac{\langle -\delta_n \rangle^2}{\delta_0} + \frac{1}{2} k_t \frac{\delta_t^2}{\delta_0}$$

( $k_n$ ,  $k_{comp}$  and  $k_t$  : stiffnesses;  $D$ : damage parameter;  $\delta = (\delta_n, \delta_t)$  : crack opening vector)

# Model Formulation

$$D = \max (D_m, D_c)$$

Variation of the cyclic damage :

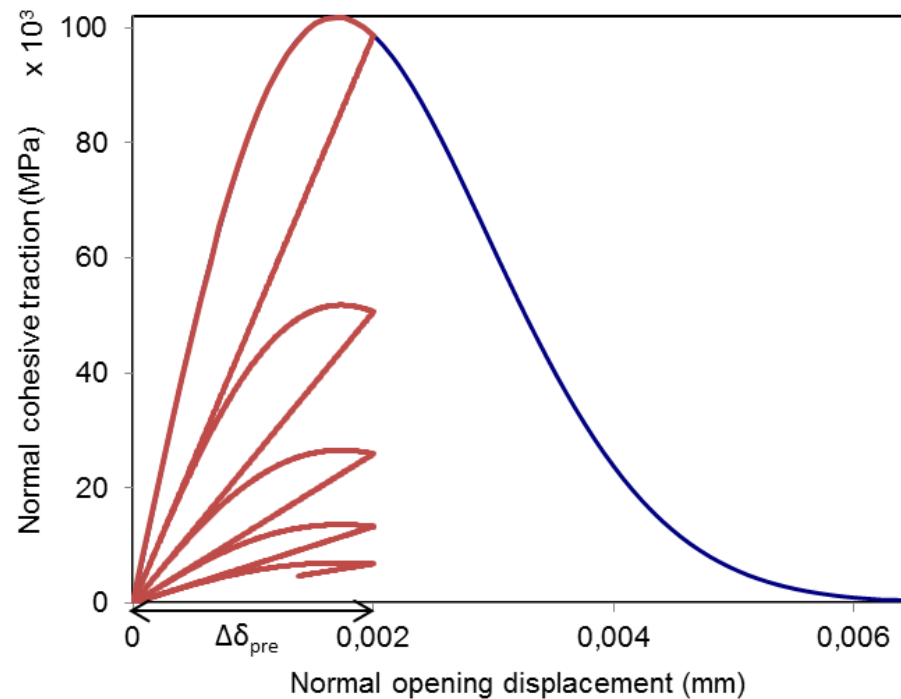
Threshold: 
$$f_c = \int_0^t \langle \dot{Y} \rangle (1 - D_c)^{n_c} d\tau - (C_c + m_c D_c) = 0$$

$$\dot{D}_c = \frac{k_n}{m_c} (1 - D_c)^{n_c} \langle \dot{\delta}_n \rangle \frac{\langle \delta_n \rangle}{\delta_0}$$

The cyclic damage can vary only if the normal displacement  $\delta_n$  is positive → **Cyclic Damage Accumulation**

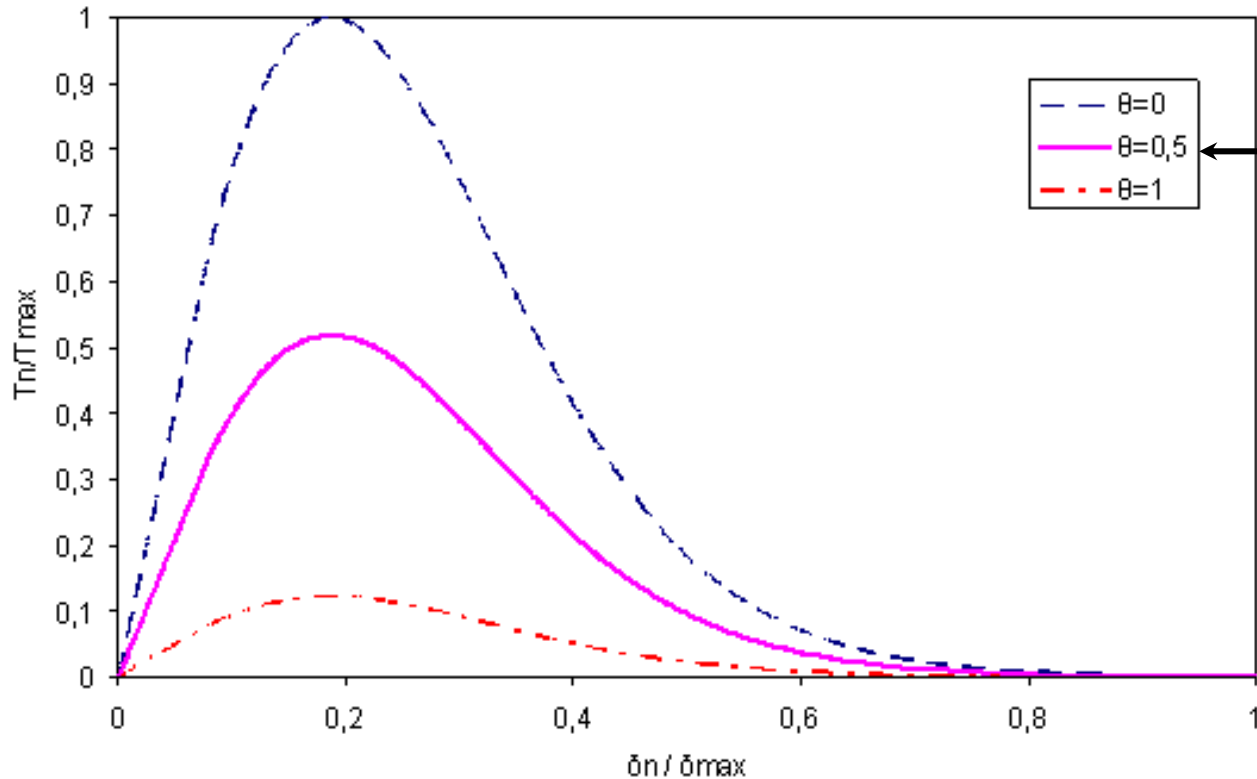
C. Moriconi, G. Henaff, D. Halm, Cohesive zone modeling of fatigue crack propagation assisted by gaseous hydrogen in metals, International Journal of Fatigue, 68 (2014) 56-66.

# Formulation du Modèle: TSL



- Chargement monotone (Courbe bleue) : Forme exponentielle
- Chargement cyclique (Courbe rouge) → Perte progressive de rigidité
- Un seul point ( $\Delta K$ ,  $da/dN$ ) est requis pour identifier la TSL

# Influence de l'hydrogène sur la TSL



Evolution de  $\theta$  contrôlée par des lois de diffusion couplées (gradient de contrainte hydrostatique, piégeage)

V. Olden, C. Thaulow, and R. Johnsen, Modelling of hydrogen diffusion and hydrogen induced cracking in supermartensitic and duplex stainless steels, *Materials & Design*, 2008; 29: 1934-1948.

# Equation de diffusion couplée

- La diffusion d'hydrogène contrôlée par:
  - Le gradient de concentration;
  - Le gradient de contrainte hydrostatique;

$$\vec{J}_m = -D_L \vec{\nabla} C_L + \frac{D_L C_L V_H}{RT} \vec{\nabla} \sigma_h \quad [\text{Krom et al, 1999}]$$

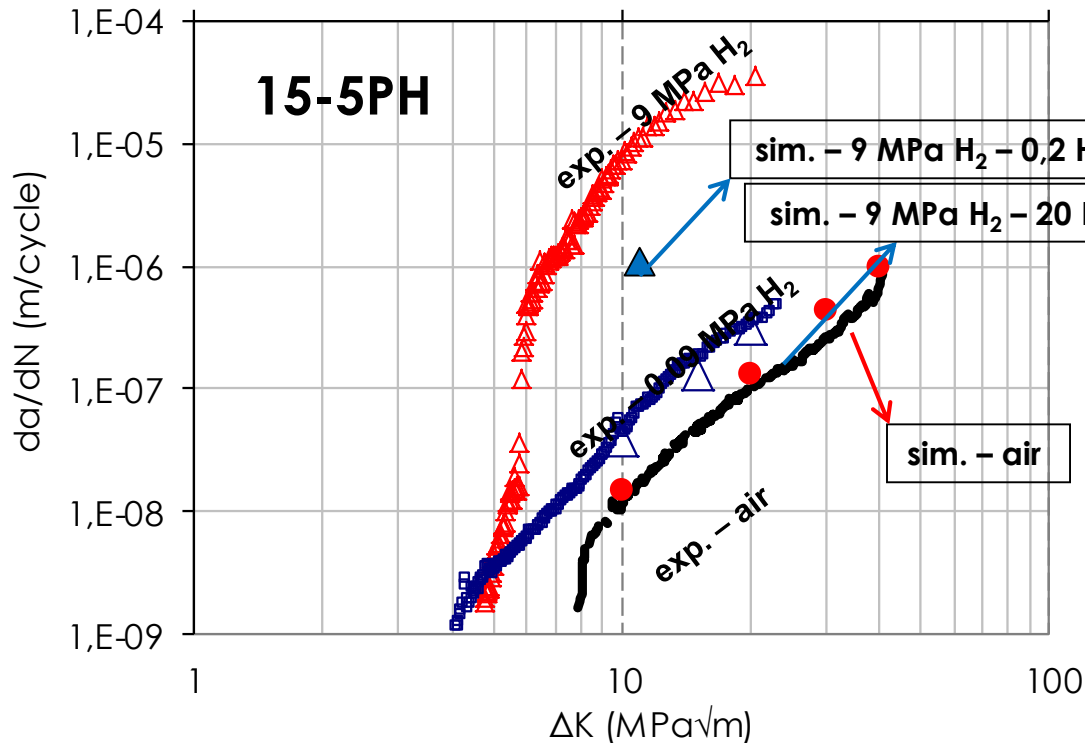
- Prise en compte du piégeage:  $C_T = \frac{N_T}{1 + \frac{1}{K_T C_L}}$  avec:

$$\log N_T = 23.26 - 2.33 \cdot \exp(-5.5 \varepsilon_p)$$

[A. J. Kumnick and H. H. Johnson, 1980]

- Procédure « temperature – déplacement » dans ABAQUS en utilisant l'analogie avec l'équation de la chaleur (concentration H ↔ température)

# Simulations of the fatigue cracks propagation: Influence of pressure



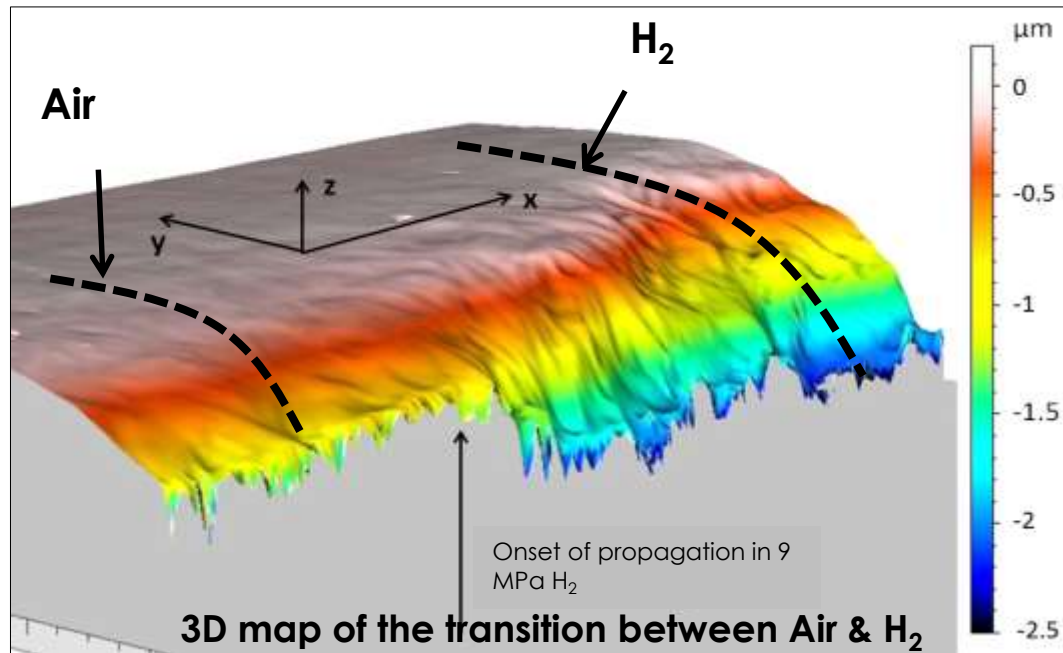
- Slight fatigue crack growth enhancement under hydrogen at a frequency of 20 Hz

- Fair agreement with experimental data at  $P=0,09$  MPa

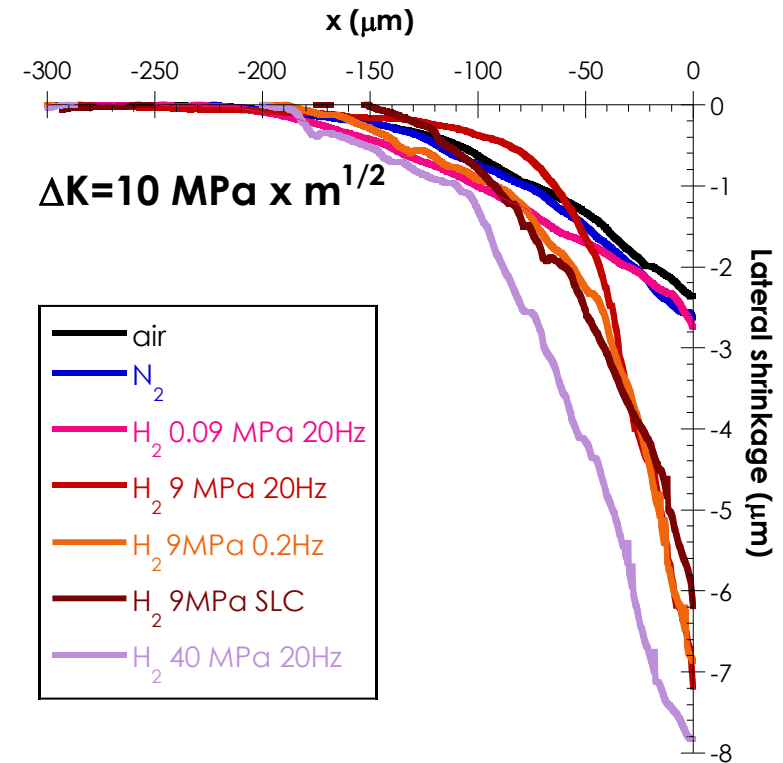
- The proposed model cannot account for the tremendous enhancement observed at high hydrogen pressure

- The model can predict the enhancement of FCGR observed at lower frequency

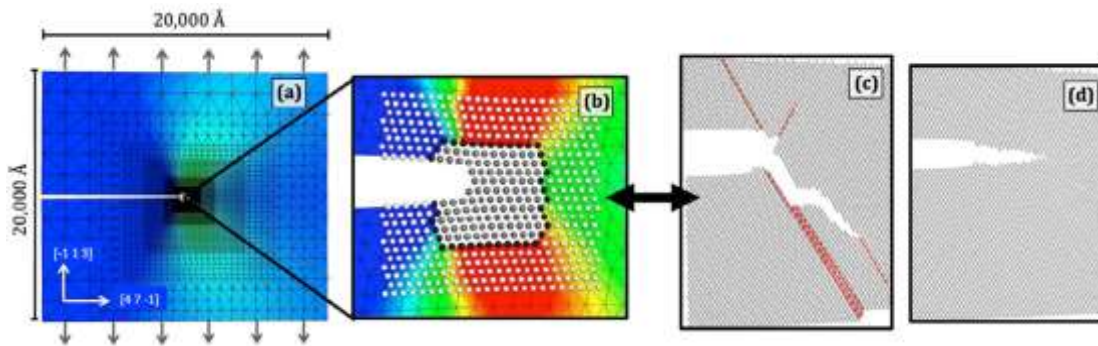
# Hydrogen effect on crack tip plasticity (martensitic PH SS)



Interferometric Confocal  
Microscope Talysurf CCI 6000

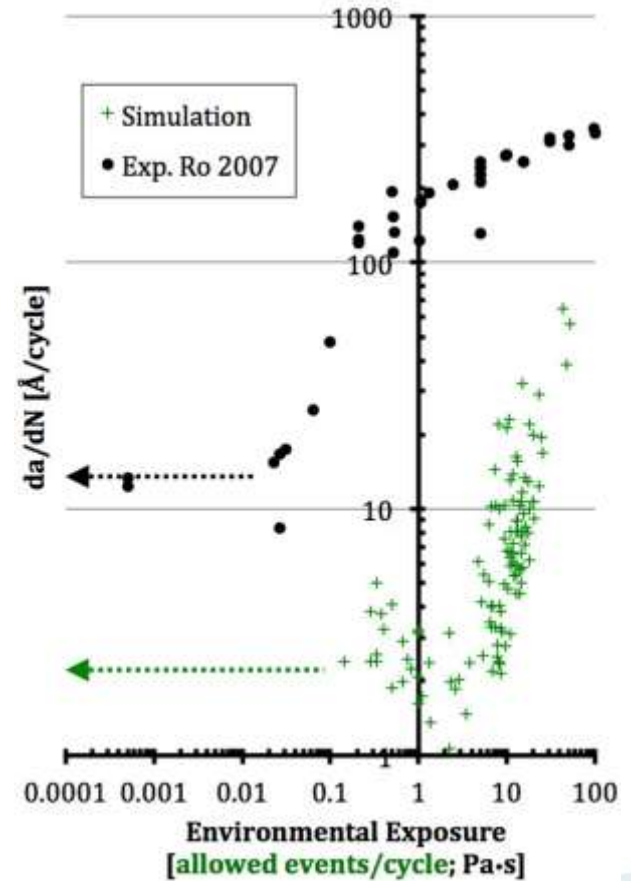


# Modélisation atomistique



[Y. Ro, S. R. Agnew, G. H. Bray, and R. P. Gangloff, Environment-exposure-dependent fatigue crack growth kinetics for Al-Cu-Mg/Li, *Materials Science and Engineering: A The McEvily Symposium: Fatigue and Fracture of Traditional and Advanced Materials*, TMS 2006, 2007; 468-470: 88-97.

R. J. Zamora, K. L. Baker, and D. H. Warner, Illuminating the chemo-mechanics of hydrogen enhanced fatigue crack growth in aluminum alloys, *Acta Materialia*, 2015; 100: 232-239.





# Messages en guise de conclusion

- Les données de fatigue établies en air pour identification et/ou validation de modèles intègrent des couplages complexes entre mécanismes de déformation et d'endommagement et espèces diffusantes ou adsorbées
- De nombreux verrous subsistent pour une description détaillée de ces processus, du fait notamment de la difficulté d'accès à des informations sur la réponse locale en pointe de fissure en présence d'hydrogène et/ou mise en œuvre de modélisations multi-physiques et multi-échelles

**Merci de votre attention**