



HAL
open science

Rupture fragile d'une interface en présence de contraintes résiduelles

Sébastien Murer, Carole Henninger, Dominique Leguillon

► **To cite this version:**

Sébastien Murer, Carole Henninger, Dominique Leguillon. Rupture fragile d'une interface en présence de contraintes résiduelles. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01509265

HAL Id: hal-01509265

<https://hal.science/hal-01509265v1>

Submitted on 16 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Rupture fragile d'une interface en présence de contraintes résiduelles

S. Murer — C. Henninger — D. Leguillon

*Laboratoire de Modélisation en Mécanique
Université Pierre et Marie Curie
Tour 55-65, 4^e - 5^e étage
Case courrier 162
4, place Jussieu
75252 Paris Cedex 05
{murer,henning,leguillo}@lmm.jussieu.fr*

RÉSUMÉ. En rupture fragile, il a été montré que la nucléation d'une fissure peut être correctement prédite par deux critères qui doivent être vérifiés simultanément : l'un basé sur un bilan d'énergie, l'autre sur une contrainte maximum. L'extension de ce résultat à l'amorçage à l'interface d'un bimatériau sous chargement mécanique et thermique est proposée et illustrée sur trois exemples industriels.

ABSTRACT. In brittle fracture, it has been shown that crack nucleation can be accurately predicted by two criteria which have to be simultaneously satisfied : one relies on an energy balance whereas the other one is based upon a maximal tensile stress. It is shown that it is possible to extend this result to the initiation of a crack at the interface of a bimaterial under both mechanical and thermal loading, along with three industrial cases.

MOTS-CLÉS : Rupture fragile, contraintes résiduelles, champs singuliers, interface

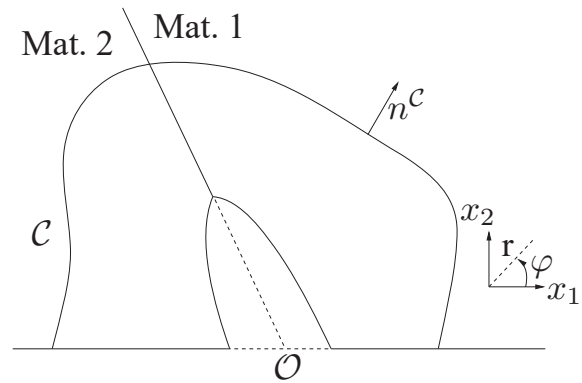
KEYWORDS: Brittle fracture, residual stresses, singular fields, interface

Introduction

Les concentrations de contraintes liées aux chargements mécaniques et thermiques, susceptibles de causer l'amorçage d'une fissure à l'interface d'un bimatériau, se traduisent en élasticité linéaire par un champ dit *singulier* et un scalaire appelé facteur d'intensité généralisé K . Le champ de déplacements peut se mettre sous la forme d'une série de termes caractérisés par un exposant de singularité réel λ (compris entre 0 et 1) dépendant de la géométrie locale et des propriétés matériaux, et par K , qui dépend de la géométrie globale et du chargement de la structure :

$$\underline{U}(x_1, x_2) = \underline{U}(\mathcal{O}) + Kr^\lambda \underline{u}(\varphi) + \dots \quad [1]$$

(r, φ) sont les coordonnées polaires ayant pour origine le point singulier \mathcal{O} . Pour des raisons pratiques, le champ de déplacements est normalisé de manière à ce que la contrainte d'ouverture à l'interface soit égale à 1.



Il a été montré (Leguillon, 2002) que lorsque K atteint une valeur limite K_c , il y a création brutale d'une fissure de longueur l_0 (petite), la détermination de K est donc essentielle dans cette approche.

Calcul de K , K_c et l_0

En présence d'un chargement mécanique, le facteur d'intensité K est déterminé à l'aide de l'intégrale de contour déduite du théorème de Betti (Leguillon *et al.*, 1987) :

$$H(\underline{U}, \underline{V}) = \int_{\mathcal{C}} (\tilde{\sigma}(\underline{U}) \cdot \underline{n}^c \cdot \underline{V} - \tilde{\sigma}(\underline{V}) \cdot \underline{n}^c \cdot \underline{U}) ds \quad [2]$$

Cette intégrale est indépendante du contour \mathcal{C} choisi à condition que \underline{U} et \underline{V} vérifient des conditions d'équilibre homogènes à 0 à l'intérieur et aux bords de la zone délimitée par \mathcal{C} .

En l'absence de contraintes résiduelles, le champ de déplacements vérifie ces conditions d'homogénéité et le facteur d'intensité K est calculable à l'aide de l'in-

tégrale de contour [2] où \underline{U} est la solution calculée par éléments finis et \underline{V} le mode dual du mode singulier (cf. [1]).

Le critère de rupture

Pour qu'une fissure s'amorce, il est nécessaire de vérifier simultanément deux critères : l'un en énergie, l'autre en contrainte (Leguillon, 2002).

Le premier est obtenu grâce à un bilan d'énergie sur la structure avant et après l'amorçage d'une fissure de longueur l_0 : le taux de restitution d'énergie incrémental, défini par $G = -\delta W_p / \delta S$, doit être supérieur à la ténacité du matériau G_c , δW_p étant la variation d'énergie potentielle élastique et δS la variation de surface de fissure. L'expression de δW_p est obtenue suite à un développement asymptotique par rapport à la longueur de fissure l_0 . La condition en énergie s'écrit alors :

$$K^2 A l_0^{2\lambda-1} \geq G_c \quad [3]$$

où A est un facteur fonction de la géométrie locale et de la direction de rupture. Comme K , il est calculé numériquement à l'aide de l'intégrale H [2].

Le critère en contrainte stipule quant à lui que la contrainte d'ouverture en pointe de fissure doit être supérieure à la résistance en traction σ_c de l'interface. D'après la relation [1], cette condition s'écrit

$$K l_0^{\lambda-1} \geq \sigma_c \quad [4]$$

La combinaison des critères [3] et [4] fournit un critère unique d'amorçage de fissure, régi par deux paramètres : la ténacité G_c et la résistance σ_c .

$$l_0 = \frac{G_c}{A \sigma_c^2} \quad \text{et} \quad K_c = \left(\frac{G_c}{A} \right)^{1-\lambda} \sigma_c^{2\lambda-1} \quad [5]$$

Prise en compte de l'aspect thermique du problème

Les contraintes résiduelles induites par une sollicitation thermo-mécanique présentent une difficulté technique supplémentaire, les conditions d'homogénéité à 0 énoncées précédemment n'étant plus satisfaites. Pour lever cette difficulté, un terme supplémentaire $\Delta\Theta r \underline{v}(\varphi)$ est pris en compte dans le développement de la solution :

$$\underline{U}(x_1, x_2) = \underline{U}(0, 0) + K r^\lambda \underline{u}(\varphi) + \Delta\Theta r \underline{v}(\varphi) + \dots \quad [6]$$

où $\Delta\Theta$ est l'amplitude de température du chargement thermique supposée constante dans toute la structure. Le coefficient K intègre désormais, en plus de la

composante mécanique K^m , une composante thermique K^Θ : $K = K^m + \Delta\Theta K^\Theta$. L'intégrale de contour [2] est alors toujours utilisable à condition d'utiliser le champ modifié $\underline{U} - \Delta\Theta r\underline{v}$, qui, lui, vérifie des conditions homogènes. La longueur d'amorçage et le critère s'écrivent alors :

$$l_0 = \frac{G_c}{A(\sigma_c - \Delta\Theta\bar{\sigma})^2} \quad \text{et} \quad K_c = \left(\frac{G_c}{A}\right)^{1-\lambda} (\sigma_c - \Delta\Theta\bar{\sigma})^{2\lambda-1} \quad [7]$$

Ici, $\bar{\sigma}$ est la composante de traction du champ de contrainte $C : (\nabla\underline{v}(\varphi) - \alpha\underline{I})$, elle modifie la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte.

Applications

La mise en oeuvre de cette approche est illustrée ci-dessous sur plusieurs applications à caractère industriel en cours.

Exemple 1 : Rupture d'une interface dans une cellule élémentaire de pile à combustible SOFC

La température de fonctionnement relativement élevée (800°C) des piles à combustible de type SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) est responsable de l'apparition de contraintes importantes au voisinage des extrémités (cf. fig. 1).

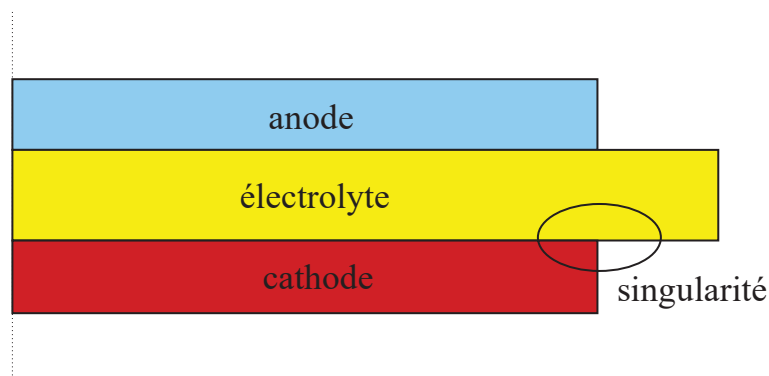


Figure 1. Schéma de la cellule élémentaire

La structure est constituée de trois couches de matériaux de type céramique et céramique-métal de quelques dizaines à quelques centaines de microns d'épaisseur.

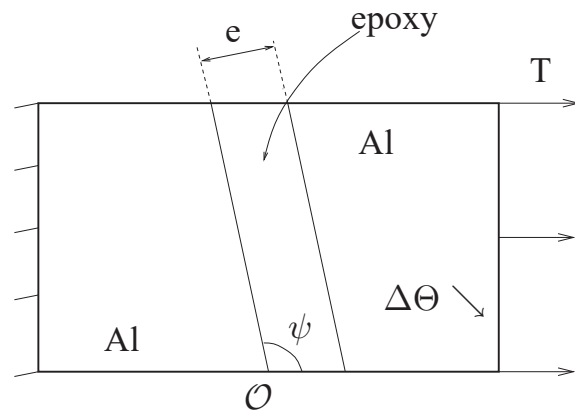
L'expression du facteur d'intensité généralisé critique K_c permet d'isoler la variation de température critique $\Delta\Theta_c$. Nous avons ainsi pu estimer une valeur du refroidissement, à partir de la température d'élaboration, susceptible de provoquer la décohésion des couches $\Delta\Theta_c = -531^\circ\text{C}$ (négative), mais avec une fissure se propageant non pas le long de l'interface cathode-électrolyte, mais à l'intérieur de

l'électrolyte (à partir d'une étude paramétrique sur la direction de propagation).

Des études sont également en cours concernant d'autres géométries de cellules élémentaires.

Exemple 2 : Rupture d'un joint de colle epoxy

Des éprouvettes composées de deux substrats d'aluminium réunis par une couche adhésive en epoxy d'épaisseur e sont testées en traction uniaxiale T , après avoir subi une variation en température de $\Delta\Theta = -100^\circ\text{C}$ (Qian *et al.*, 1998). Différentes orientations du joint ont été testées ($\psi = 90^\circ, 105^\circ$ et 120°). La rupture a lieu au point O (le plus singulier). L'analyse est menée sur l'interphase seule, les substrats ayant un comportement essentiellement rigide par rapport à la couche d'adhésif.



La figure 2 montre les résultats expérimentaux (Qian *et al.*, 1998) et numériques pour $\psi = 90^\circ$ et $\psi = 105^\circ$. Les contraintes à rupture obtenues en négligeant les contraintes résiduelles (CR) dépassent largement les mesures expérimentales et justifient la correction du critère [5]. Le critère [7] fournit des résultats en bon accord avec l'expérience.

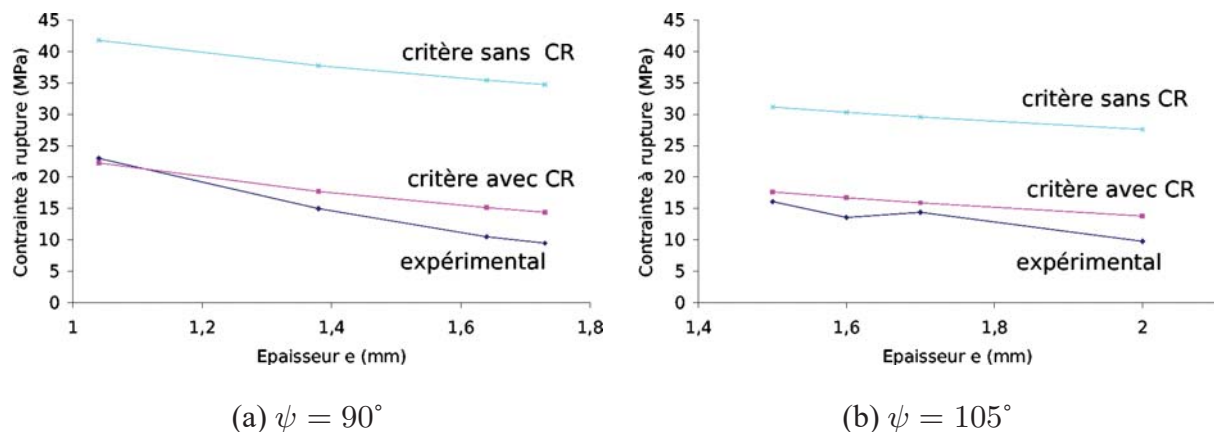


Figure 2. Contrainte à rupture (MPa) en fonction de l'épaisseur du joint e (mm)

Exemple 3 : Rupture d'un assemblage dans le bouclier thermique d'un tokamak

Le bouclier thermique du tokamak Tore Supra (CEA Cadarache) étudié est composé de tuiles composites à base de fibres de carbone (CFC) posées sur une structure métallique formée essentiellement de cuivre (cf. fig. 3).

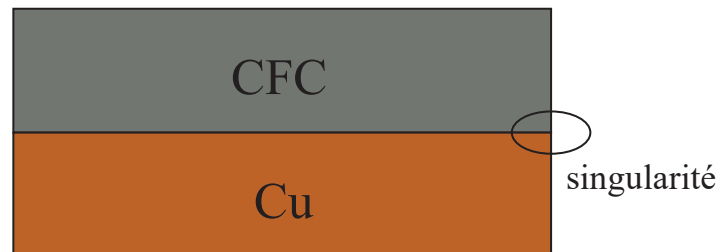


Figure 3. Vue schématique du bouclier thermique d'un tokamak

Cet ensemble subit un refroidissement d'environ 450°C pendant la fabrication. Le critère [7] ne prévoit pas l'amorçage de fissures pour un tel refroidissement. En effet, le terme supplémentaire $\bar{\sigma}$ induit par la présence de contraintes résiduelles est négatif, ce qui tend en réalité à renforcer l'interface.

L'analyse thermo-élastique a donc été enrichie par la prise en compte des contraintes dues à la plasticité du cuivre, qui sont importantes pour les variations de température considérées. L'analyse proposée est toujours valable à condition de supposer que les déformations résiduelles plastiques restent approximativement constantes au voisinage du point considéré. Sous ces hypothèses, le critère [7] ne prévoit pas non plus l'amorçage de fissures pour un refroidissement de -450°C . On peut également supposer une variation des déformations plastiques selon une loi en puissance de type Ramberg-Osgood (Rice *et al.*, 1968). Cette étude est en cours.

Bibliographie

- Leguillon D., « Strength or toughness ? A criterion for crack onset at a notch », *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 21, p. 61-72, 2002.
- Leguillon D., Sanchez-Palencia E., *Computation of singular solutions in elliptic problems and elasticity*, J. Wiley, New-York and Masson, Paris, 1987.
- Qian Z., Akisanya A. R., « An experimental investigation of failure initiation in bonded joints », *Acta Mater.*, vol. 46, n° 14, p. 4895-4904, 1998.
- Rice J. R., Rosengren G. F., « Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material », *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 16, p. 1-12, 1968.