



**HAL**  
open science

# Rupture élastoplastique: définition d'un taux de restitution d'énergie et application à l'étude du préchargement à chaud

Yves Wadier, Eric Lorentz

► **To cite this version:**

Yves Wadier, Eric Lorentz. Rupture élastoplastique: définition d'un taux de restitution d'énergie et application à l'étude du préchargement à chaud. CFM 2005 - 17ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-00331749

**HAL Id: hal-00331749**

**<https://hal.science/hal-00331749>**

Submitted on 27 Sep 2023

**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.

# Rupture élastoplastique : définition d'un taux de restitution d'énergie et application à l'étude du préchargement à chaud

Yves Wadier, Eric Lorentz

Laboratoire de mécanique des structures industrielles durables (LaMSID),  
Unité mixte de recherche CNRS/Electricité de France  
1, avenue du Général de Gaulle  
92141 Clamart cedex

## Résumé :

*En rupture élastoplastique, la modélisation d'une fissure par une coupure du plan est source de difficultés. On choisit alors de modéliser la fissure par une entaille très fine et on définit un taux de restitution de l'énergie en plasticité, appelé  $G_P$ , en s'appuyant sur la formulation de Francfort-Marigo pour les milieux fragiles, étendue à la plasticité. Cette approche est appliquée à l'interprétation d'un essai de préchargement à chaud sur une maquette cylindrique en acier artificiellement dégradé, soumise à un chargement thermomécanique représentatif d'un transitoire réel (mise en charge puis refroidissement avec décroissance de la charge). L'effet de préchargement à chaud, qui correspond à une très nette augmentation de la ténacité apparente du matériau (mesurée sur éprouvette CT) lorsque la maquette est soumise à ce type de chargement, est clairement mis en évidence à l'aide de cette approche énergétique.*

## Abstract :

*Some difficulties are met in elastic-plastic fracture mechanics if the crack is modelled by a sharp tipped crack. They may be overcome with a notch model. An energy release rate, called  $G_P$ , can be defined using the Francfort-Marigo theory for brittle media, extended to plasticity. This approach is applied to the analysis of a "warm pre-stress" test on a cylinder made of an artificially degraded steel, submitted to a mechanical loading close to a thermal shock transient (loading, cooling and unloading). The warm pre-stress effect, associated with a significant increase of the cleavage fracture toughness at low temperature after a pre-loading at higher temperature, is clearly predicted by using this energy approach.*

## Mots clefs :

**Rupture ; plasticité ; entaille ; taux de restitution d'énergie ; Beremin ;**

## 1 Introduction

Nous utilisons ici une approche énergétique de la mécanique de la rupture élastoplastique fondée sur la formulation de Francfort-Marigo pour les milieux fragiles. On définit un paramètre, appelé «  $G_P$  », qui est un taux de restitution d'énergie, valide dans le cadre de l'élastoplasticité incrémentale. Il permet d'analyser toutes les situations de rupture par clivage ou l'approche globale classique, fondée sur le paramètre  $J$ , n'est plus valide (problèmes avec décharges, chargements non proportionnels, contraintes résiduelles, etc.).

Cette approche est appliquée à l'étude de l'effet dit « de préchargement à chaud » qui a été fréquemment observé au cours d'essais sur les aciers des centrales REP. Cet effet consiste en une augmentation significative de la valeur de la ténacité apparente à basse température, après réalisation d'un préchargement à température ambiante. Il permet d'affirmer qu'on ne peut initier un défaut quand le facteur d'intensité des contraintes décroît avec la température, même si la ténacité (mesurée sans préchargement) est atteinte. Cette affirmation est d'une grande importance en regard de l'intégrité des composants sous pression des centrales REP, et plus particulièrement de la cuve, où la ténacité est approchée lors de certains chocs thermiques.

## 2 Rappels sur l'approche énergétique

### 2.1 Utilisation de la théorie de Francfort Marigo

La théorie de Francfort et Marigo [1] généralise la théorie de Griffith puisqu'elle permet de prévoir en particulier l'initiation et la propagation brutale de fissures. La formulation utilisée en élasticité se fonde sur la minimisation d'une énergie  $E_{FM}$  qui dépend à la fois des déplacements  $u$  et des surfaces fissurées potentielles  $S$  (ou nouvellement créées  $\Delta S$ ) :

$$E_{FM}(u, S) = \int_{\Omega \setminus S} \Phi_{el}(\varepsilon(u)) d\Omega + G_c \text{Aire}(\Delta S)$$

où  $\Omega$  est le domaine occupé par la structure,  $\Phi_{el}$  la densité d'énergie libre élastique et  $G_c$  l'énergie de fissuration du matériau. Conformément à l'hypothèse de Griffith, l'énergie dissipée est bien proportionnelle à l'aire de la surface créée.

Cette formulation a été étendue récemment à la plasticité en introduisant la contribution plastique dans l'énergie libre et dans le potentiel de dissipation, et en supposant que les mécanismes de dissipations plastique et de rupture sont indépendants [2]. On peut alors définir un taux de restitution d'énergie, appelé  $G_p$  ( $G$  « plastique »), et la minimisation de l'énergie  $E_{FM}$  est équivalente à la maximisation de ce paramètre.

Des effets d'échelle, induits par l'hypothèse de Griffith, nous ont amené à abandonner le modèle de fissure au profit d'un modèle d'entaille. Ce modèle nous conduit à nous appuyer à la fois sur la formulation de Francfort Marigo mais aussi sur la mécanique continue de l'endommagement, la zone de propagation de l'entaille étant alors considéré comme une zone pouvant s'endommager [3]. Cette approche a été appliquée avec succès à différentes problématiques importantes pour l'ingénieur traitant des applications en mécanique de la rupture, comme l'effet « petit défaut » [4], l'effet de décharge [5], et l'effet de préchargement à chaud [6].

### 2.2 Définition et calcul du paramètre $G_p$

On considère donc une fissure modélisée par une entaille d'épaisseur très fine (cf. figure. 1). Cette entaille a la forme d'un « cigare », le fond d'entaille  $\Gamma$  étant représenté par un demi cercle de rayon «  $r$  » très petit. La zone de propagation de l'entaille est notée  $Z_e$  et la longueur de propagation potentielle  $\Delta l$ .

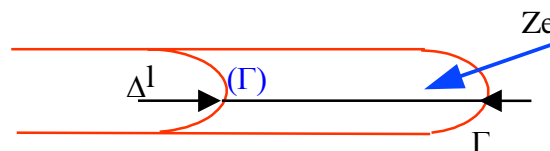


FIG. 1 – Modélisation de la fissure par une entaille.

Le paramètre  $G_p$  est défini (cf. [3]), comme le maximum par rapport à  $\Delta l$ , longueur de propagation de l'entaille, de l'intégrale sur la zone de propagation  $Z_e$  de l'énergie élastique  $w_e$  divisée par la distance  $\Delta l$ . En 2D, cela donne la formule :

$$G_p = \max_{\Delta l} \left[ \left( \int_{Z_e} (w_e \cdot dS) \right) / \Delta l \right]$$

Sur le plan numérique il s'agit donc de réaliser un post-traitement d'un calcul éléments finis donnant accès aux valeurs de l'énergie élastique pour différentes valeurs de  $\Delta l$ , distance considérée par rapport au fond initial d'entaille. La seule contrainte est alors de modéliser la fissure par une entaille, et de mailler finement la zone du fond d'entaille ainsi que le prolongement de celle-ci sur une distance suffisamment grande pour pouvoir trouver le maximum.

### 3 Définition du problème et modélisation

Un essai a été réalisé au laboratoire MPA de Stuttgart sur un cylindre fissuré soumis à un chargement combinant effets mécaniques et thermiques dans le but de démontrer l'effet bénéfique du préchargement à chaud pour les composants fissurés des centrales REP. Cet essai se veut représentatif des conditions réelles : géométrie cylindrique proche de celle d'une virole de cuve et chargement thermomécanique proche d'un transitoire vu par une cuve. Le matériau est un acier allemand dénommé 17MoV84 mod. C'est un matériau dégradé artificiellement par traitement thermique afin de pouvoir simuler le comportement d'un matériau irradié en fin de vie. Malgré un préchargement élevé à haute température, le défaut ne s'amorce pas lors du refroidissement bien que le paramètre de rupture  $K_J$  (déduit du paramètre  $J$  par la formule d'Irwin) dépasse largement sa valeur critique  $K_{Jc}$  (ténacité du matériau). La rupture a finalement lieu à température ambiante, pour une valeur de  $K_J$  très supérieure à la valeur de la ténacité. L'effet bénéfique du préchargement à chaud est donc alors clairement mis en évidence. On présente ici la définition du problème et la modélisation qui en a été faite pour appliquer l'approche énergétique de la rupture élastoplastique. Il s'agit donc de simuler numériquement l'essai du MPA afin d'évaluer les capacités prédictives de cette approche.

#### 3.1 Définition du problème

Précisons les données relatives à la géométrie ainsi que celles relatives au matériau et au chargement. La géométrie de l'éprouvette cylindrique est présentée à la figure 2a. La courbe de traction du matériau dépend de la température. La courbe expérimentale donnant la ténacité en fonction de la température est connue entre 0°C et 300°C. L'approche dite « Master Curve » permet d'associer à cette courbe différents niveaux de probabilité de rupture, par exemple : 5%, 50% et 95%. On appelle respectivement Min, Moy, Max les courbes de ténacité associées à ces 3 niveaux de probabilité. Le cycle de préchargement à chaud considéré, dénommé LCUF (Loading, Cooling, Unloading, Fracture), peut être décrit ainsi :

1. mise en charge à 289,5°C jusqu'à 2,1 MN (Loading) et application du transitoire thermique,
2. maintien de la charge et décroissance de la température jusqu'à une valeur de 35°C (Cooling),
3. décroissance de la charge à 0 (Unloading), puis augmentation jusqu'à rupture (Fracture),

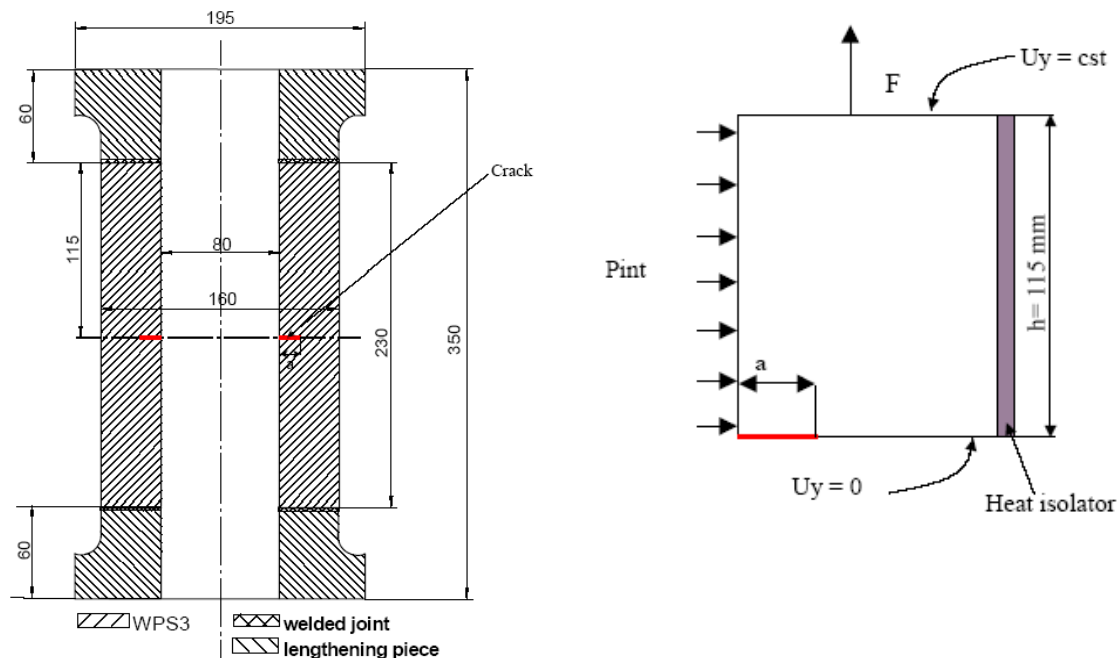


FIG. 2a et 2b – Géométrie de l'éprouvette et conditions aux limites.

### 3.2 Modélisation

On traitera le problème en 2D, axisymétrique. On ne considère qu'une moitié de structure, à cause des conditions de symétrie. Les conditions aux limites sont présentées à la figure 2b. Le matériau considéré a un comportement élastoplastique mais n'a pas été caractérisé à la décharge. Afin d'avoir une idée de l'influence du choix du modèle de comportement sur les résultats obtenus on a testé différents types de critères et d'écrouissages : critère de Von Mises avec écrouissage isotrope linéaire ou borné, mais aussi écrouissage cinématique de Chaboche. Les coefficients de cette loi ont fait l'objet d'une identification [7]. Les courbes de traction correspondantes approchent au mieux les courbes expérimentales. On a aussi considéré le cas de l'écrouissage isotrope basé sur cette représentation cinématique des courbes de traction. En résumé, 4 cas d'écrouissage ont donc été considérés :

- écrouissage isotrope linéaire avec critère de Von Mises,
- écrouissage isotrope borné avec critère de Von Mises,
- écrouissage cinématique de Chaboche,
- écrouissage isotrope borné avec critère de Von Mises, basé sur la courbe cinématique.

Le maillage de la zone du fond d'entaille est présenté à la Figure 3. Il contient 10112 nœuds. Le rayon en fond d'entaille est égal à 100 microns et la taille du plus petit élément est d'environ 20 microns.

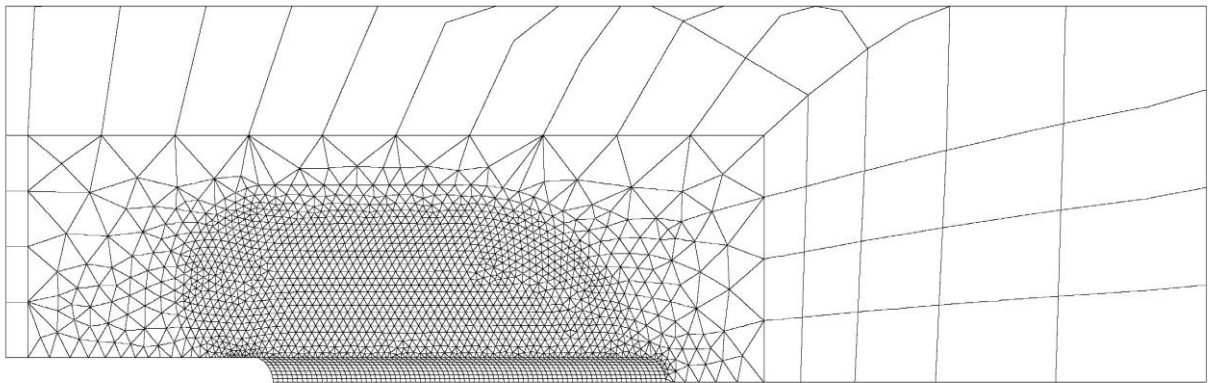


FIG. 3 – Maillage de la zone en fond d'entaille

### 3.3 Définition d'une probabilité de rupture

Pour donner une présentation probabiliste des résultats obtenus et comparer ultérieurement approche énergétique et modèle de Beremin modifié [7], il est utile de définir une probabilité de rupture dans le cadre de l'approche énergétique. On procède alors par analogie. La probabilité de rupture de l'approche énergétique est définie similairement à la probabilité de rupture du modèle de Beremin par la formule :

$$P_r = 1 - \exp \left[ -a \left( G_p / G_{p0} \right)^{m/2} \right]$$

où « a » et « m » sont des constantes identifiées à partir des résultats expérimentaux, et  $G_{p0}$  une constante telle que  $P_r$  soit égal à 5% quand  $G_p$  est égal à la valeur identifiée pour une probabilité de rupture de 5%.

## 4 Identification de $G_{PC}$

Il est nécessaire d'identifier  $G_{PC}$ , valeur critique de  $G_p$ , à la température de rupture de l'éprouvette, soit 35°C. Pour cela on modélise l'essai de rupture d'une l'éprouvette CT soumise à un chargement en traction monotone. Le paramètre J est calculé au moyen de la méthode G-théta [8], et la valeur critique de J, soit  $J_c$ , nous permet d'identifier la valeur critique du chargement correspondant à la rupture de l'éprouvette. La valeur du paramètre  $G_p$  correspondant à ce chargement critique nous permet alors d'identifier  $G_{PC}$ .

## 5 Résultats obtenus

### 5.1 Grandeurs globales et locales

*Variation du COD (ouverture de fissure) :* en ce qui concerne le COD on a pu noter un bon accord sur la valeur maximum : 0,18 mm prévu pour 0,20 mm mesuré (jauge G2) ou 0,25 mm (jauge G1), et un très bon accord sur la variation globale en fonction du temps. La représentation de l'écroissage n'a que peu d'influence.

*Variation du  $K_J$  :* les courbe  $K_J$  – temps font apparaître une évolution très semblable à celle du COD avec une annulation qui correspond à celle du chargement appliqué, mais qui est en fait imposée puisque la valeur de J (qui n'a plus de sens) devient négative. L'influence de la représentation de l'écroissage qui se traduit par une variation de la valeur maximum de  $K_J$  inférieure à 10% est assez faible mais non négligeable.

*Contrainte d'ouverture en fond d'entaille :* on constate la décroissance très rapide de cette contrainte d'ouverture lors du refroidissement puisqu'elle s'annule au bout de 70 secondes environ, devient fortement négative et le reste jusqu'au rechargement à rupture. L'influence de l'écroissage est assez faible sur cette contrainte.

*Contrainte de Von Mises en fond d'entaille :* en ce qui concerne la contrainte de Von Mises, par contre, on remarque un effet très net de la représentation de l'écroissage, avec des variations beaucoup plus faibles de la contrainte quand on considère l'écroissage cinématique.

### 5.2 Résultats en terme de probabilité de rupture

Il s'agit maintenant de comparer les résultats obtenus par l'approche énergétique aux résultats expérimentaux. Pour cela on utilise les graphes probabilistes du modèle de Beremin donnant la probabilité de rupture en fonction du  $K_J$  (cf. la Figure 4). Si on considère la probabilité de 95%, on obtient :

- écroissage isotrope linéaire :  $K_J = 74,2 \text{ MPa.m}^{1/2}$
- écroissage isotrope borné :  $K_J = 74,9 \text{ MPa.m}^{1/2}$
- écroissage cinématique :  $K_J = 77,7 \text{ MPa.m}^{1/2}$

Le cas écroissage cinématique donne la valeur la plus élevée et la plus proche de la valeur expérimentale. Ceci ne constitue pas une preuve du caractère cinématique de l'écroissage mais pose la question d'une identification plus précise du comportement du matériau : quelle est la part isotrope et quelle est la part cinématique dans l'écroissage ? La valeur obtenue, égale à  $77,7 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , n'est que de 14% inférieure à la valeur expérimentale, égale elle à  $90 \text{ MPa.m}^{1/2}$ .

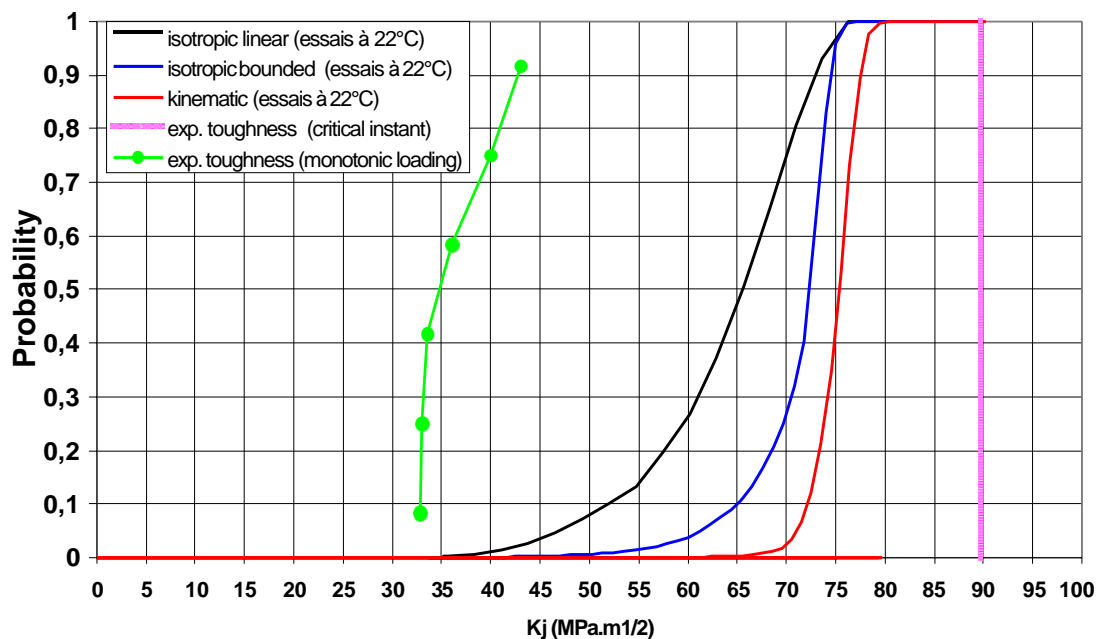


FIG. 4 – Probabilité de rupture fonction du  $K_J$ .

## 6 Conclusion

Nous avons développé une approche énergétique dans le domaine de la rupture élastoplastique et défini un taux de restitution d'énergie appelé  $G_p$ . Contrairement à l'approche basée sur le paramètre  $J$ , cette approche est valide dans toutes les situations de chargements non proportionnels et donc en particulier dans le cas du préchargement à chaud. Elle a été appliquée à l'interprétation d'un essai réalisé au MPA de Stuttgart sur une structure cylindrique fissurée en matériau 17MoV84mod. et soumise à un chargement de type LCUF.

L'accord entre résultats du calcul et résultats expérimentaux est bon, qu'il s'agisse des variables température ou COD ou qu'il s'agisse de la variable  $K_J$ . En ce qui concerne les grandeurs locales, on note une chute très rapide de la contrainte d'ouverture en fond d'entaille et une influence notable de l'érouissage sur la contrainte de Von Mises, toujours en fond d'entaille.

Les courbes donnant la probabilité de rupture en fonction du  $K_J$  sont les plus pertinentes pour juger du caractère prédictif de l'approche utilisée et de l'importance du choix de l'érouissage du matériau. On a mis en évidence une variation de la valeur du  $K_J$  allant jusqu'à 15% selon le type d'érouissage choisi. On obtient une valeur de  $77.7 \text{ MPa.m}^{1/2}$  si on utilise un érouissage cinématique. C'est la valeur la plus élevée et la plus proche de la valeur expérimentale égale à  $90 \text{ MPa.m}^{1/2}$ . Ceci pose la question d'une identification plus précise du comportement du matériau : quelle est la part isotrope et quelle est la part cinématique dans l'érouissage ? Par ailleurs, l'écart entre le résultat obtenu par l'approche énergétique et le résultat expérimental étant de 14% on peut conclure au caractère prédictif satisfaisant de cette approche qu'il reste à comparer à l'approche Beremin.

## References

- [1] Francfort G. and Marigo. J.J., « Revisiting Brittle Fracture as an Energy Minimisation Problem ». *J. Mech. Phys. Sol.*, 46, n°8, pp. 1319-1342, 1998.
- [2] Lorentz E., Wadier Y., Debruyne G., « Mécanique de la rupture en présence de plasticité : définition d'un taux de restitution d'énergie ». *C.R.A.S. t. 328, série IIB*, pp.657-662, 2000.
- [3] Lorentz E., Wadier Y. : « L'approche énergétique de la rupture élastoplastique appliquée à la modélisation de la propagation d'une entaille ». *REEF, Vol 13, n°5-6-7*, pp. 583-592, 2004.
- [4] Wadier Y., Bonnamy M. : « Programme VOCALIST : the energy approach of elastoplastic fracture mechanics applied to the analysis of the shallow crack effect ». *ASME PVP-2003*, published in *PVP-Vol. 462*, pp. 147-154, 2003.
- [5] Wadier Y., Lorentz E., « The energetic approach of elastic-plastic fracture mechanics applied to the problem of unloading ». *SMiRT 16, Washington*, paper n° 1365, 2001.
- [6] Wadier Y., Bonnamy M. : « The energy approach of elastoplastic fracture mechanics applied to the analysis of the Warm Pre-stress effect ». *ASME PVP-2003*, published in *PVP-Vol. 461*, pp. 89-95, 2003.
- [7] R. Masson et al. : « A modified Beremin model to simulate the warm pre-stress effect ». *Journal of Nuclear Engineering and Design*, 216, pp. 27-42, 2002.
- [8] Ph. Destuynder, M. Djaoua : « Sur une interprétation mathématique de l'intégrale de Rice en théorie de la rupture fragile ». *Math. Meth. In Applied Sciences*, N°3, pp. 70-87, 1981.