

Méthode Gp : prédiction de la rupture fragile lors d'un essai de pré-chargement à chaud

S. Jules¹, C. Duhamel¹, S. Géniaut¹

¹ EDF R&D, France, {samuel.jules, constance.duhamel, samuel.geniaut}@edf.fr

Résumé — Depuis les années 2000, une approche énergétique en mécanique de la rupture est développée par EDF R&D en vue de prédire l'amorçage de fissure en clivage. Cette méthode, appelée Gp, est fondée sur des calculs d'énergie dans la zone endommagée en pointe de défaut. On illustre dans ce papier la mise en œuvre de cette approche afin d'interpréter un essai expérimental de pré-chargement à chaud, à l'aide d'une nouvelle formulation de Gp. Les résultats montrent que la méthode est plus adaptée que l'approche en J pour prédire l'instant de rupture pour ce type d'essai.

Mots clefs — Rupture quasi-fragile, WPS, Gp.

1. Introduction

1.1. Contexte industriel et intérêt du pré-chargement à chaud

La justification de la tenue mécanique de certains composants des centrales nucléaires se base sur les paramètres classiques de la mécanique de la rupture (J , G). Ces derniers ont plusieurs limites intrinsèques, et ne permettent pas notamment de prendre en compte l'effet bénéfique du pré-chargement à chaud (WPS en anglais) sur la ténacité effective des composants métalliques. Ainsi, l'utilisation industrielle de ces approches peut impliquer un niveau très élevé de conservatisme, souhaité initialement, mais parfois excessif.

L'objectif de la méthode Gp est de proposer un paramètre et un critère simple permettant de prédire la rupture fragile de manière plus réaliste que J . En principes, cette approche est valide dans un périmètre plus important que celui des approches classiques, et notamment dans le cas des chargements de type décharge.

1.2. Définition du paramètre Gp

La méthode Gp a été développée à EDF par Wadier dans les années 2000. Les fondements théoriques établis alors sont exposés en détails dans [5] et [2]. Parmi les différents ingrédients nécessaires à l'obtention du paramètre, on note qu'on modélise la fissure par une entaille à fond circulaire d'épaisseur D , comme le montre la Figure 1. Ensuite, on définit des zones d'endommagement virtuelles de longueur Δa dans le prolongement de l'entaille, restreintes aux domaines géométriques $C(\Delta a)$, illustrées en grisée.

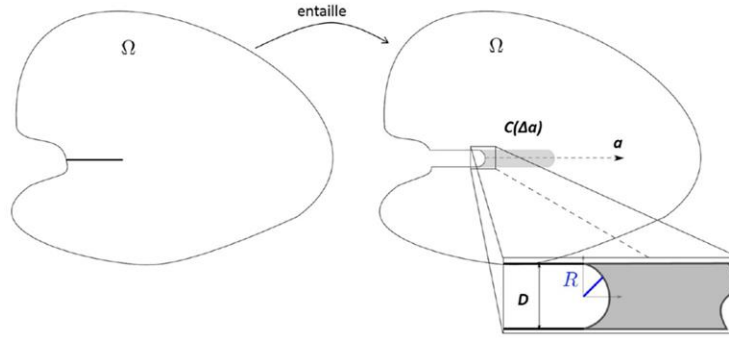


Figure 1: Entaille et zone de propagation virtuelle de la fissure

Grâce à la combinaison de différentes hypothèses explicitées par Wadier et al. dans [5] ainsi qu'à la définition de l'énergie totale, l'application d'un principe de minimisation conduit au critère déterministe, simple, qui prétend qu'il n'y a pas amorçage de la fissure tant que le scalaire G_p reste inférieur strictement à un seuil critique appelé G_{pc} . Ce paramètre G_p est la valeur maximale de la fonction $\widetilde{G}_p(\Delta a)$ définit ci-dessous :

$$G_p = \max_{\Delta a} \widetilde{G}_p(\Delta a) \quad (1)$$

avec

$$\widetilde{G}_p(\Delta a) = \frac{\int_{C(\Delta a)} \phi_{el} d\Omega}{\Delta a} \quad (2)$$

et Φ^{el} , l'énergie élastique, calculée dans la zone $C(\Delta a)$. Haboussa et al. [1] ont récemment proposé une modification de la forme de cette énergie afin de pouvoir distinguer les états de traction et de compression.

La figure 2 illustre un maillage optimisé de la zone de propagation virtuelle d'une demi-entaille, dans laquelle les fonctions $\widetilde{G}_p(\Delta a)$ seront calculés en post-traitement d'un calcul de type éléments finis. La figure 3 présente la forme typique de cette fonction à un instant donné, avec l'existence du maximum, G_p , mesure de la sollicitation du défaut.

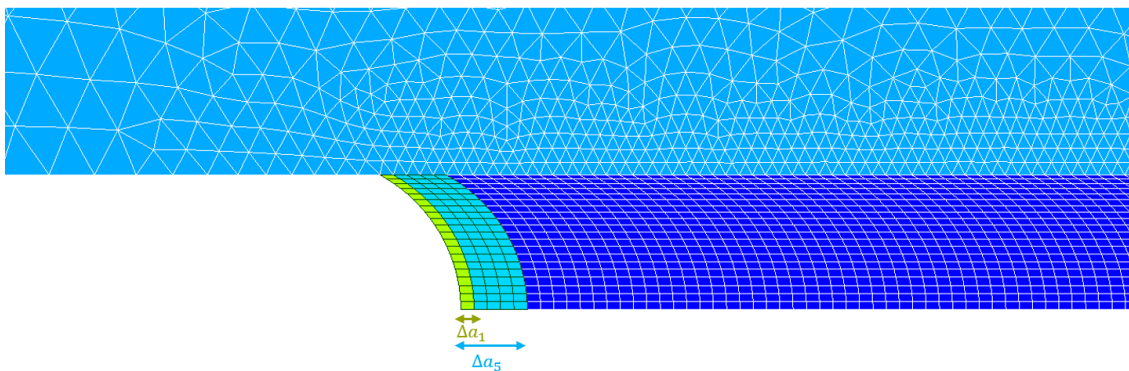


Figure 2: Maillage optimisé de la zone de propagation virtuelle et illustration des zones $C(\Delta a_1)$ et $C(\Delta a_5)$

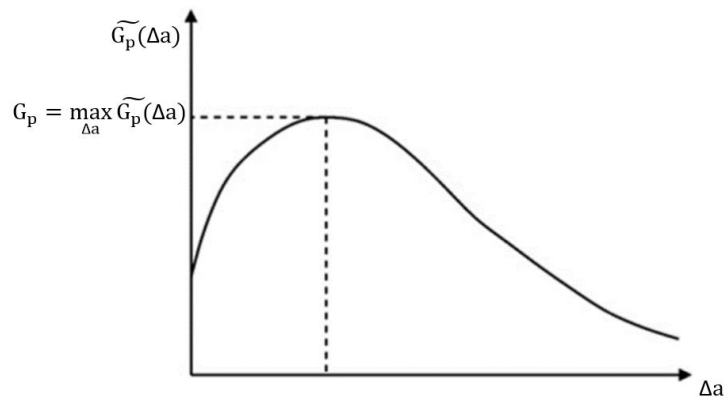


Figure 3: Exemple d'évolution de \widetilde{G}_p en fonction de la longueur de la zone de propagation virtuelle

1.3. Démarche pour l'identification du seuil G_{pc}

La méthode repose sur la comparaison de G_p à un paramètre intrinsèque G_{pc} . Ce dernier dépend de la température et du rayon choisi pour modéliser l'entaille. L'identification de G_{pc} nécessite systématiquement un calcul numérique.

La démarche consiste ainsi à modéliser un essai mécanique expérimental, tel que la rupture d'une éprouvette CT, jusqu'à l'effort limite qui est connu. G_{pc} est défini alors comme la valeur de G_p calculée au dernier instant du calcul.

1.4. Démarche pour la prédiction de la rupture

L'utilisation de G_p pour mesurer d'une part la proximité à la rupture (la « marge ») et d'autre part l'instant d'amorçage d'une structure pré-fissurée s'entend à un rayon d'entaille donné. Dans les faits, on vérifie que les résultats obtenus (marge et effort à rupture) ne dépendent pas du rayon d'entaille, en faisant varier ce dernier dans des études de sensibilité, typiquement dans une gamme de ~ 10 à $200 \mu\text{m}$.

Alors, pour prédire un effort à rupture dans un composant, on calcul tout d'abord sa réponse mécanique à un chargement considéré. Puis, en post-traitement du calcul, on obtient l'évolution de G_p en fonction du temps (via l'opérateur `CALC_GP` dans `code_aster`). Enfin, on prétend qu'il y a amorçage de la fissure lorsque $G_p(t) = G_{pc}$.

On se propose par la suite de mesurer la marge, FM , par le ratio $FM = G_{pc}/G_p$. Il n'y a pas amorçage tant que $FM > 1$.

2. Application sur un chargement LCF

Plusieurs familles d'essais de pré-chargement à chaud sur éprouvette CT25 ont été réalisés au MPA de Stuttgart et au CEA dans le cadre du projet de recherche SMILE [4, 3]. Wadier et Bonnamy [6] ont pu interpréter avec succès l'un de ces essais avec G_p . Cet essai est appelé LCF, pour « Load Cool Fracture ». Après un chargement à 20°C , l'éprouvette est refroidie sous chargement constant jusqu'à la température de -150°C . Puis, le chargement est augmenté jusqu'à la rupture, la température restant à -150°C . La figure 4 décrit l'évolution de l'effort imposé en fonction de la température pendant ce cycle.

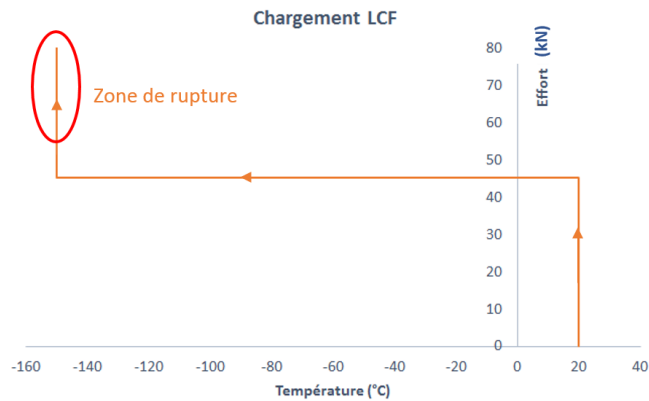


Figure 4: Trajet de chargement LCF

Dans ce travail, on propose d'interpréter le même essai LCF, en appliquant cette fois-ci la nouvelle formulation de G_p [1] (qui fait intervenir une distinction entre traction et compression). On portera une attention plus particulière que dans l'étude de référence à l'analyse de sensibilité de la marge à rupture $FM(t)$ au cours de la phase de refroidissement.

2.1. Caractéristiques du modèle

Le matériau est en acier ferritique 18MND5. Le maillage EF illustré par la Figure 5 est quadratique. Le modèle est en 2D déformations planes et l'on considère par symétrie une demi-éprouvette CT qui implique la modélisation d'une demi-entaille pour le défaut. Le calcul est thermomécanique quasi-statique non-linéaire. On utilise une loi de comportement élastoplastique de type von Mises avec écrouissage isotrope décrit par une courbe de traction (VMIS_ISOT_TRAC dans code_aster). Le calcul du paramètre G_p est réalisé en post-traitement à tous les instants.

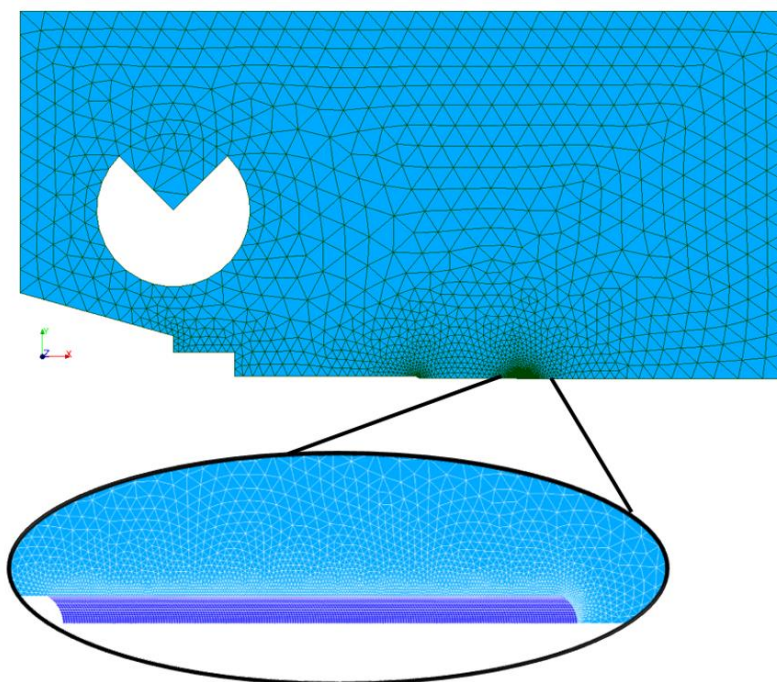


Figure 5 : Maillage d'une l'éprouvette en 2D avec la zone de propagation virtuelle de la fissure

Les parties identification et prédiction sont effectuées sur le même maillage. Concernant l'identification des G_{pc} , on utilise tout d'abord la « Master Curve » [7, 3] de l'acier 18MND5 afin de déterminer les efforts critiques de la CT25 à différents niveaux de probabilité de rupture et à différentes températures.

2.1. Résultats observés

2.1.1. Identification de G_{pc}

L'identification du G_{pc} a été réalisée à trois niveaux de probabilité de rupture différents, et à trois températures. Le tableau 1 récapitule les grandeurs obtenues pour une largeur de demi-entaille de $H=50 \mu\text{m}$.

Tableau 1 : Valeurs de G_{pc} identifiées à -150°C , -100°C et -50°C

Hauteur d'entaille (μm)	Température ($^\circ\text{C}$)	$G_{pc}(P_f = 5\%)$ (kJ/m^2)	$G_{pc}(P_f = 50\%)$ (kJ/m^2)	$G_{pc}(P_f = 95\%)$ (kJ/m^2)
50	-150	0,496	0,630	0,718
	-100	0,494	0,622	0,729
	-50	0,637	0,861	1,026

2.1.2. Prédiction de la rupture pour le LCF

D'une part, l'effort à rupture prédit par l'atteinte du critère $G_p=G_{pc}$ à l'issue du trajet de chargement LCF considéré est :

- très proche de l'expérimental, avec moins de 5% d'écart pour les trois probabilités de rupture considérées comme l'illustre la Figure 6,
- indépendant de la hauteur d'entaille choisie parmi 20, 50 et 150 μm (3,7 % d'écart).

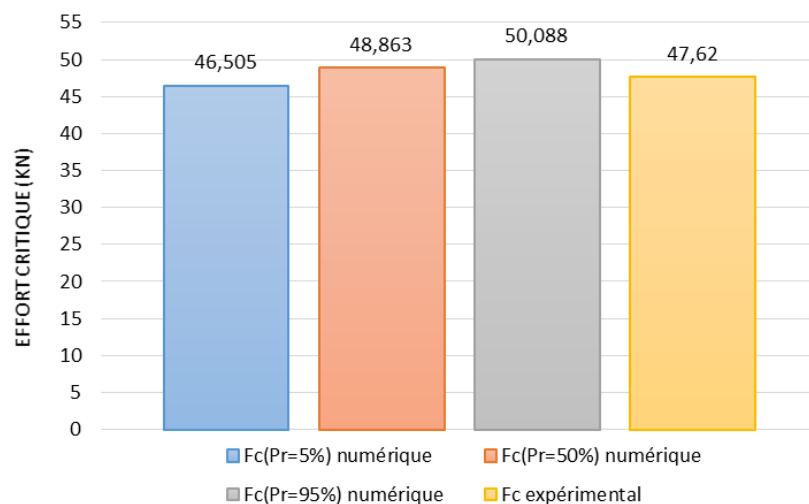


Figure 6 : Efforts critiques prédits par G_p ($H = 50 \mu\text{m}$)

D'autre part, le critère de rupture n'est pas atteint pendant la phase de refroidissement (la valeur minimale de FM reste strictement supérieure à 1 aux trois températures examinées), pour les trois probabilités considérées, voir Figure 7.

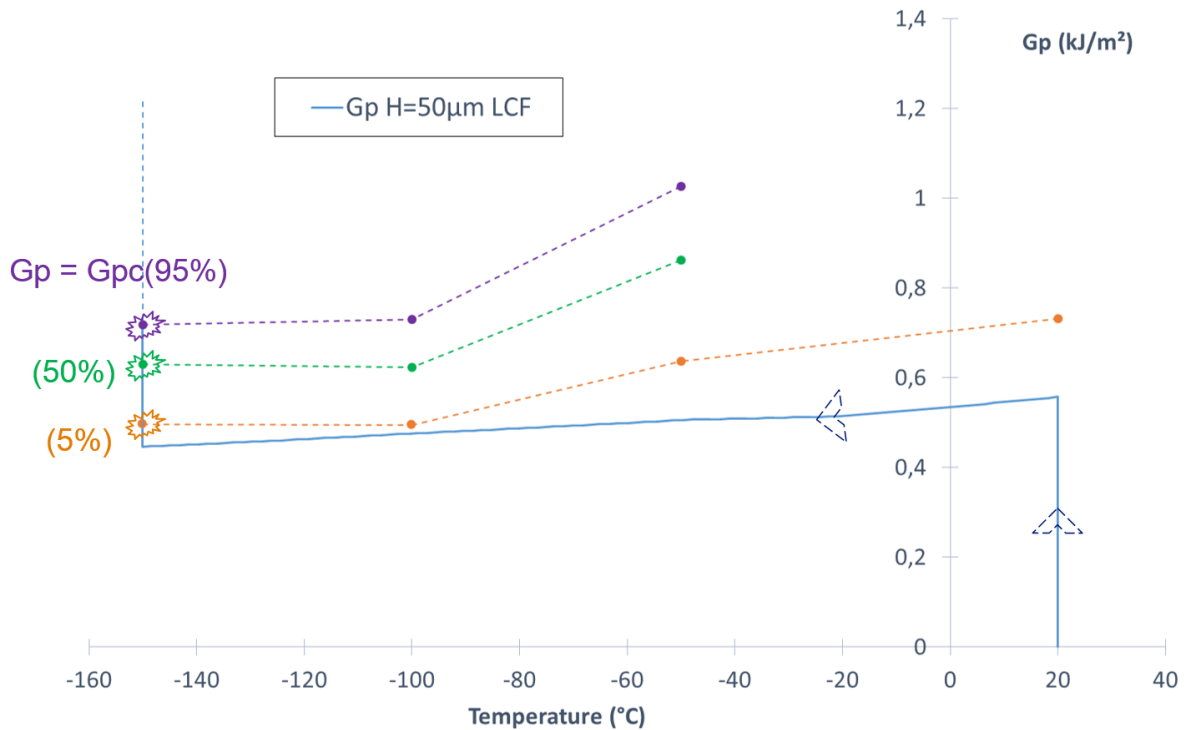


Figure 7: Evolution de Gp et Gpc en fonction de la température

3. Conclusions et perspectives

Ce travail propose de mettre en œuvre l'approche Gp afin d'interpréter un essai mécanique de pré-chargement à chaud. La rupture est prédite de manière satisfaisante, ce qui montre le potentiel de la méthode pour mieux prédire la marge à rupture par rapport aux approches classiques en J . Le rayon d'entaille a peu d'influence sur l'effort à rupture prédit. Cependant, des analyses sont en cours afin de quantifier son influence sur la marge à rupture.

Références

- [1] Haboussa, D. et al. "Correction en compression de l'approche Gp." *13e colloque national en calcul des structures*, 2017.
- [2] Jules, S. et al. "Méthode Gp: une approche énergétique de la prédiction du clivage." *13e colloque national en calcul des structures*, 2017.
- [3] Lefevre, W. et al. "A modified Beremin model to simulate the warm pre-stress effect." *Nuclear Engineering and design* 216.1-3 : 27-42, 2002.
- [4] Valeta, M. P. et al. "Structural behavior during a PTS transient taking into account the WPS effect." *International journal of pressure vessels and piping* 78.2-3 : 137-146, 2001.
- [5] Wadier, Y. et al. "An energy approach to predict cleavage fracture under non-proportional loading", *Engineering Fracture Mechanics*, 97, 30-51, 2013.
- [6] Wadier, Yves, and M. Bonnamy. "The energy approach of elastic-plastic fracture mechanics applied to the analysis of the warm pre-stress effect." *ASME 2003 Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2003.

- [7] Wallin, K. "Master curve analysis of ductile to brittle transition region fracture toughness round robin data." The "EURO" Fracture Toughness Curve, 1998.