

Identification expérimentale de modèles de zones cohésives à partir de techniques d'imagerie thermomécanique

S.Wen^{a,b,c}, Y.Monerie^{a,c}, B.Wattrisse^{b,c}

a. Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN), DPAM, CE Cadarache, bat. 702, BP3-13115
Saint-Paul-Lez-Durance Cedex, France

b. Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, Université Montpellier 2, CC 408, Pl. E. Bataillon, 34095
Montpellier Cedex 5, France

c. Laboratoire MIST, IRSN-CNRS-UM2, France

Résumé :

On s'intéresse dans ce travail à la modélisation du comportement élastoplastique endommageable d'un matériau ductile. L'endommagement est ici associé à un comportement cohésif de l'interface entre des éléments volumiques purement élasto-plastiques. L'approche expérimentale proposée utilise des mesures cinématiques et thermiques. Ces mesures permettent d'accéder, sous certaines hypothèses, aux distributions locales des champs thermomécaniques. Ces distributions permettent alors d'identifier la forme et les paramètres de la loi de zone cohésive, et de s'assurer de sa cohérence thermomécanique.

Abstract :

This work is focused on the modeling of the elastoplastic damageable behavior of ductile materials. The damage is associated with a cohesive behavior of the interface between the purely elasto-plastic solid elements. The proposed experimental approach uses kinematic and thermal measurements. Under certain assumptions, these measures allow us to get the distributions of local thermomechanical fields. These distributions can be used to identify the shape and the parameters of the cohesive zone model, and then ensure its thermomechanical consistency.

Mots clefs : zone cohésive, corrélation d'images numériques, thermographie infrarouge, dissipation

1 Introduction

Le contexte de ce travail concerne la modélisation numérique des gaines de combustible nucléaire sous chargement thermomécanique lors de situations accidentelles (figure 1). Dans ce cadre, il est nécessaire de comprendre et de reproduire fidèlement les mécanismes d'endommagement et de fissuration pour les matériaux utilisés dans ces applications.

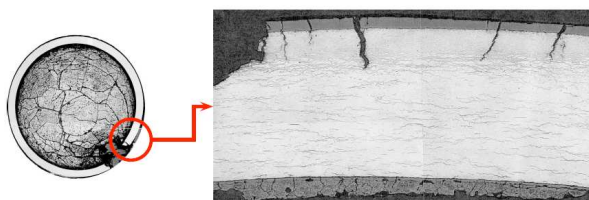


FIG. 1 – Gains de combustible

Les modèles de zone cohésive (MZC), introduits par les travaux de Dugdale [1] et de Barenblatt [2], sont souvent utilisés pour simuler la fissuration des matériaux solides. Ces modèles décrivent la fissuration par un « saut » de déplacement entre des éléments volumiques et rendent compte de l'initiation, de la croissance et de la coalescence de microfissures.

Dans cette étude, les modèles de zone cohésive sont utilisés comme un moyen de résumer un endommagement volumique sur une surface. Le comportement élastoplastique endommageable global est scindé en deux contributions : la première est un comportement purement élastoplastique incompressible correspondant à la réponse volumique (durcissante) ; la seconde est un comportement endommageable associé à la réponse cohésive (adoucissante). Tous les effets de l'endommagement sont ainsi ramenés sur la zone cohésive. Dans une approche éléments finis, cela revient à considérer des éléments volumiques purement élastoplastique séparés par une interface cohésive adoucissante (voir figure 2). L'enjeu est ici de caractériser individuellement les réponses volumiques et surfaciques à partir des mesures expérimentales dans le but d'identifier la nature et les paramètres du modèle cohésif. Dans le cadre de ce travail, l'identification se base sur des mesures locales de champs de déformation obtenues par corrélation d'images numériques (CIN).

Un bilan énergétique est effectué pour vérifier la cohérence thermodynamique de modèle obtenu. Cette partie du travail est associée à la mise en place d'une analyse couplée des mesures cinématiques et énergétiques. Les mesures thermiques sont obtenues par thermographie infrarouge (TIR).

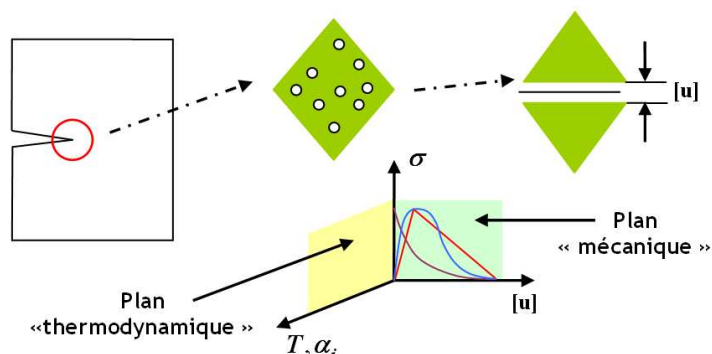


FIG. 2 – Lois de zone cohésive

2 Dispositifs expérimentaux



FIG. 3 – Dispositifs expérimentaux

Les dispositifs expérimentaux incluent une machine de traction, une caméra CCD et une caméra infrarouge (figure 3). Ces deux caméras sont placées perpendiculairement à la surface de l'éprouvette. Chaque caméra est contrôlée par un système informatique. La synchronisation de l'acquisition des images et des signaux analogiques issus de la machine d'essais est assurée par un dispositif électronique (SynchroCAM), développé au laboratoire. La fréquence d'une caméra est choisie comme référence et elle est soit multipliée soit divisée par un facteur entier pour piloter l'autre caméra afin de s'assurer de l'existence d'images communes entre les deux caméras.

3 Traitements d'images numériques

La Corrélation d'Images Numériques permet d'accéder aux évolutions des champs de grandeurs cinématiques (déplacements, déformations, ...) au cours de l'essai, alors que la Thermographie Infrarouge permet d'obtenir les mesures thermiques locales à partir desquelles seront construits les bilans d'énergie. Ces deux techniques sont détaillées dans les deux paragraphes suivants.

3.1 Corrélation d'images numériques

La corrélation d'images numériques permet d'accéder à des mesures locales de champs de déplacement à partir des images en niveaux de gris fournies par la caméra CCD. Le contraste nécessaire à la CIN est obtenu ici en recouvrant l'éprouvette d'un mouchetis afin d'obtenir un marquage aléatoire. On adopte ici un critère de type corrélation croisée normalisée, associé à une hypothèse de transformation rigide des motifs de corrélation [3].

Une fois les champs de déplacement calculés, la déformation et la vitesse de déformation sont estimées en dérivant les champs de déplacement en espace et en temps. Les composantes hors plan du tenseur des déformations sont estimées grâce à une hypothèse d'isotropie transverse justifiée ici par la faible épaisseur de l'échantillon.

3.2 Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge donne accès aux champs thermiques à partir des images fournies par la caméra infrarouge. L'éprouvette étudiée émet un rayonnement électromagnétique dont la partie appartenant à la bande spectrale du capteur infrarouge est convertie en signal électrique avant d'être numérisé par la caméra. Le rayonnement émis par une surface à une température donnée est lié à son émissivité. Pour homogénéiser et augmenter l'émissivité, la surface en vis-à-vis de la caméra infrarouge est revêtue d'une fine couche de peinture noire. Afin d'éviter les dérives introduites par les fluctuations de la température interne de la caméra infrarouge, les essais sont réalisés après stabilisation thermique de la caméra (durée des transitions estimée à trois ou quatre heures).

L'opération d'étalonnage permet de convertir le rayonnement numérisé par chaque pixel en température. La procédure d'étalonnage est décrite dans [4]. L'étalonnage permet aussi d'isoler les pixels ayant des réponses thermiques non reproductibles. Ces pixels sont identifiés et non pris en compte dans tous les traitements ultérieurs (pas de remplacement) afin d'éviter d'introduire des corrélations entre pixels voisins. Dans les essais utilisés pour ce travail, nous avons rencontré environ 0.05% de tels « pixels défectueux ». D'un point de vue statistique, l'erreur d'étalonnage suit une loi gaussienne dont la valeur moyenne est inférieure à 0.01K, et dont l'écart-type est de 0.05K.

3.3 Correspondances entre les images

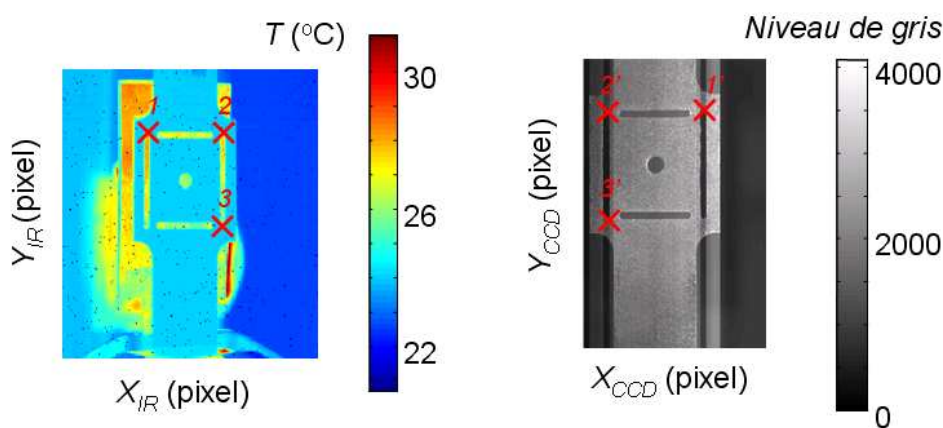


FIG. 4 – Correspondances entre les images

Pour pouvoir comparer les champs cinématiques et les calorimétriques, il est nécessaire d'identifier la transformation géométrique permettant de relier les repères des deux caméras. Les paramètres de cette transformation sont identifiés avec l'aide d'une mire (figure 4). Plusieurs points caractéristiques sont repérés sur les images visible et infrarouge de la mire. On choisit ici un modèle de la transformation qui prend compte les dilatations, les rotations et les translations entre les deux images.

4 Identification

4.1 Identification mécanique

On propose ici une méthode pour identifier la partie normale de la loi cohésive associée à un métal ductile. L'analyse qui suit est basée sur une approche unidimensionnelle associée à la direction de sollicitation imposée. Cette approche est justifiée par le faible niveau de rotation matérielle atteint dans l'éprouvette pendant le développement de la localisation.

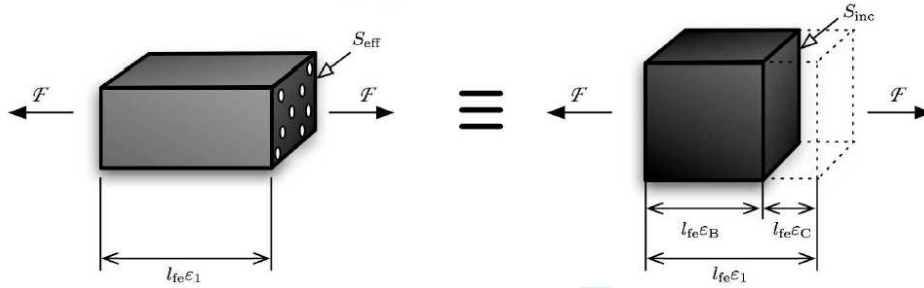


FIG. 5 – Schéma de la partition de déformation

La séparation du comportement élastoplastique endommageable en une partie volumique et une autre surfacique est réalisée par la partition de déformation (représentée sur la figure 5) : ε_1 et ε_2 sont les déformations de Hencky axiale et transverse respectivement, ε_B correspond à la déformation volumique (incompressible) et ε_C représente la déformation surfacique associée au comportement cohésif.

La proportion surfacique de microfissure D est introduite pour décrire le niveau de l'endommagement. En supposant que les microfissures sont des cavités sphériques identiques, que leur distribution spatiale est uniforme et que leur cinétique de croissance est isotrope. On peut calculer D à partir des champs de déformation :

$$D = \alpha_D (e^{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2} - 1)^{2/3} \quad \text{où} \quad \alpha_D = (3/4)^{2/3} \pi^{1/3} \quad (1)$$

En supposant que la distribution de contrainte axiale σ est uniforme sur chaque section, il est possible de déterminer les différentes contraintes introduites dans la modélisation (σ , la contrainte effective σ_{eff} et la contrainte virtuelle associée au comportement élasto-plastique non endommageable σ_{inc}) à partir des mesures de déformation, du niveau d'endommagement D et de la sections initiale S_0 :

$$\sigma = Fe^{-2\varepsilon_2} / S_0, \quad \sigma_{eff} = \sigma / (1 - D) \quad \text{et} \quad \sigma_{inc} = Fe^{\varepsilon_1} / S_0 \quad (2)$$

La connaissance du champ de déformation permet de calculer chacune de ces grandeurs localement, en chaque section droite de l'échantillon.

La fonction d'écroissage H du matériau est identifiée sur la réponse $\sigma_{eff} - \varepsilon_1$. Une hypothèse d'équivalence des déformations permet de supposer que cette fonction d'écroissage est la même que celle de la partie volumique. Connaissant σ_{inc} , on détermine ε_B en inversant la relation $\sigma_{inc} - \varepsilon_B$, et on détermine ε_C en calculant la différence entre ε_1 et ε_B :

$$\varepsilon_B = \sigma_{inc} / E + H^{-1}(\sigma_{inc}) \quad \text{et} \quad \varepsilon_C = \varepsilon_1 - \varepsilon_B \quad (3)$$

4.2 Analyse énergétique

Une analyse énergétique nous permet de contrôler la cohérence thermodynamique du modèle de zone cohésive identifié. Cette approche est effectuée par établir un bilan énergétique local obtenu en combinant les mesures cinématiques et thermiques. En combinant le 1^{er} et le 2nd principe de la thermodynamique, on obtient l'équation de la chaleur suivante :

$$\rho C(\partial\theta/\partial t + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\theta + \theta/\tau) - k\Delta\theta = w'_{ch} \quad (4)$$

où ρ représente la masse volumique, C est la chaleur spécifique, θ correspond à la variation de température, \vec{v} exprime la vitesse de déplacement, τ décrit le temps caractéristique des fuites thermique, k est le coefficient de conductivité et w'_{ch} représente la source de chaleur.

Dans cette équation, la dérivée particulière $\dot{\theta} = \partial\theta/\partial t + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\theta$ est calculée en combinant les mesures cinématiques (\vec{v}) et thermiques (θ) [5].

Dans le cas traité ici, la source de chaleur est associée à un couplage thermoélastique et la dissipation intrinsèque. Si la température de l'éprouvette reste proche de la température à l'équilibre (T_0), on peut écrire le couplage thermoélastique sous la forme :

$$w'_{the} = -\lambda T_0 \text{tr}(\dot{\sigma}) \quad (5)$$

Le terme λ représente ici le coefficient de dilatation linéaire.

La dissipation correspond ainsi à la différence entre la source de chaleur totale et le couplage thermoélastique. Cette dissipation regroupe la dissipation associée aux mécanismes de plasticité, et d'endommagement.

5 Résultats

5.1 Identification mécanique

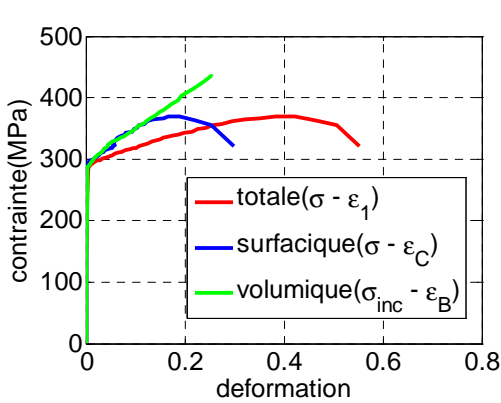


FIG. 6 – Réponse mécanique de la zone de localisation

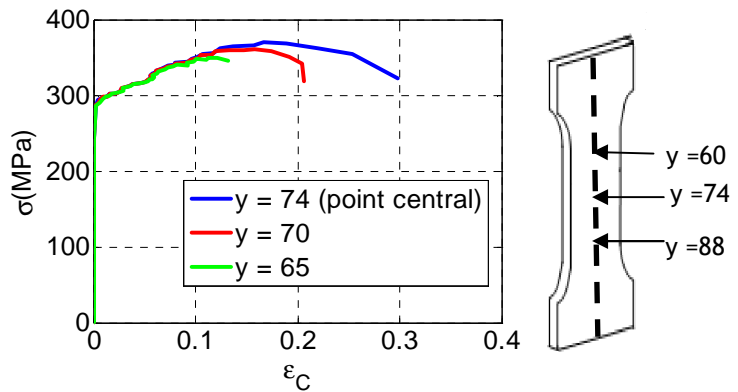


FIG. 7 – Réponses surfaciques en trois points

La figure 6 montre les réponses mécaniques au point final de localisation de la fissure. La partie volumique possède un comportement durcissant et la zone cohésive un comportement adoucissant. On compare les réponses surfaciques en trois points différents de l'éprouvette sur la figure 7. Les courbes sont relativement bien superposées malgré la présence de localisation. La réponse surfacique est exprimée ici au travers d'une relation contrainte-déformation surfacique. Pour la ramener à une réponse cohésive classique, reliant une contrainte cohésive à un « saut » de déplacement, il est nécessaire d'introduire une longueur caractéristique. Cette étape est en cours de réalisation, la principale difficulté étant de s'affranchir des différentes longueurs caractéristiques introduites dans les traitements de données.

5.2 Analyse énergétique

La figure 8.a représente l'évolution globale des sources de chaleur au cours de la sollicitation imposée (trois charges entrecoupées par deux décharges). La figure 8.b donne uniquement la réponse énergétique de la fin de la première charge (t=240s) au début de la seconde charge (t=360s). Dans les zones 1 et 1' (« charge plastique »), la dissipation intrinsèque, représentée par en bleu est prépondérante. Dans les zones 2 et 4

(respectivement décharge et charge « élastique »), le couplage thermoélastique associé à la courbe verte est prépondérant. Ce terme de couplage correspond à une source positive pendant la décharge et une source négative pendant la charge. La zone 3 correspond à une période où aucune sollicitation n'est imposée. On observe bien l'absence de source de chaleur. Ces observations sont en accord avec un comportement thermo-élasto-plastique endommageable, ne présentant pas d'endommagement à la décharge.

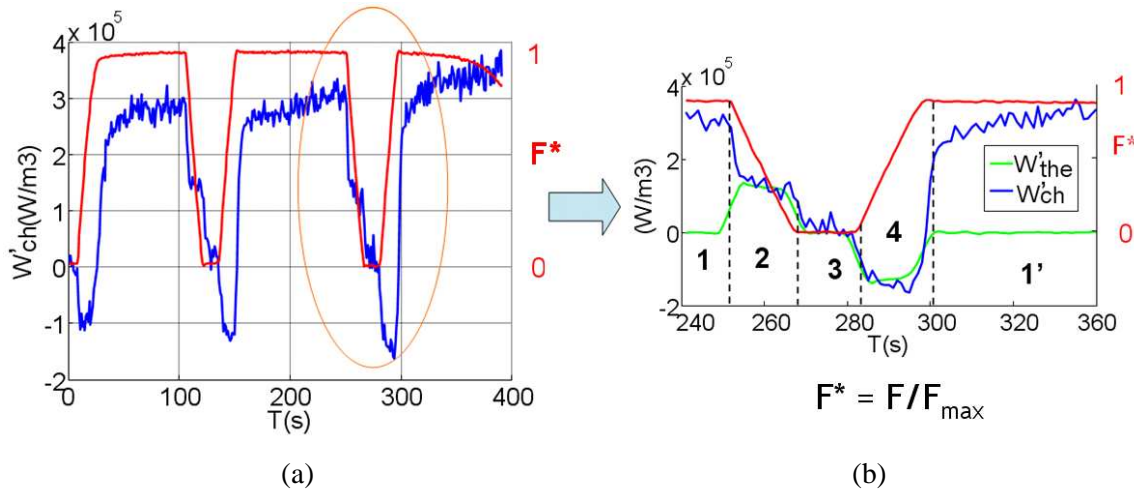


FIG. 8 – Evolution des sources de chaleur

6 Perspectives

Les lois cohésives identifiées sont associées à des relations entre une contrainte et une déformation cohésives. Or, les modèles de zone cohésive sont souvent introduits au travers de relation entre une contrainte et un « saut » de déplacement : une étape est en cours de réalisation pour déterminer la longueur caractéristique associée au travers d'une approche mêlant simulation numérique et expérimentation.

Par ailleurs, le protocole expérimental peut être amélioré par l'introduction de mesures de stéréocorrélation. Cette étape permettra de contrôler la forme complète de l'échantillon en cours d'essai, et donc de limiter les hypothèses consenties pour la description de la cinématique (isotropie transverse).

Enfin, sur le plan thermodynamique, l'analyse présentée est associée à un bilan global. Les travaux à venir visent à estimer plus localement les différentes énergies mises en jeu. L'objectif est d'aboutir à une caractérisation thermomécanique complète des lois de zone cohésive, dans un premier temps pour des matériaux et des sollicitations « modèles », puis pour des situations plus proches des applications réelles.

Références

- [1] Dugdale D.S., Yielding of steel sheets containing slits, *J. of the Mech. and Ph. of Sol*, 8, pp.100-104, 1960
- [2] Barenblatt G.I., The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture, *Adv. Appl. Mech.*, 7,, pp. 55-129, 1962
- [3] Bornert M., Brémand F., Doumalin P., Dupré J.C., Fazzini M., Grédiac M., Hild F., Mistou S., Molimard J, Orteu J.J., Robert L., Surrel Y., Vacher P., Wattrisse B., Assessment of measurement errors in local displacements by Digital Image Correlation: methodology and results, *Exp. Mech.*, 49(3), pp. 353-370, 2009
- [4] Honorat V., Moreau S., Muracciole J-M., Wattrisse B., Chrysochoos., A., Calorimetric analysis of polymer behaviour using a pixel calibration of an IRFPA camera, *Int. J. Quantitative Infrared Thermogr.* 2, pp153–172, 2005
- [5] Chrysochoos A., Wattrisse B., Muracciole J.M., El Kaïm Y., Fields of stored energy associated with localized necking of steel, *J. Mech. Mat. Struct.*, 4(2), pp. 245-262, 2009