

MODÉLISATION MICROMÉCANIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT DUCTILE PAR APPROCHE COHÉSIVE-VOLUMIQUE

N.-B. Nkoumbou Kaptchouang^{a,c}, Y. Monerie^{b,c}, P.-G. Vincent^{a,c}

^a IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, B.P. 3, 13115 Saint-Paul-lez-Durance Cedex, France,

^bLMGC, Univ. Montpellier, CNRS, CC 048, 34095 Montpellier Cedex, France,

^c MIST : Laboratoire de Micromécanique et Intégrité des Structures, IRSN-CNRS-Univ. Montpellier, France
noe-brice.nkoumboukaptchouang@irsn.fr, yann.monerie@umontpellier.fr, pierre-guy.vincent@irsn.fr

Mots-clefs : Micromécanique, rupture ductile, modèle GTN, zone cohésive, simulation numérique.

1 Introduction

Le présent travail aborde la modélisation et la simulation numérique de la propagation de fissure dans un matériau ductile dont la rupture survient suite à un mécanisme de nucléation, croissance et coalescence de phases poreuses. La démarche globale de modélisation et de simulation adoptée repose sur une approche aux éléments finis cohésifs-volumiques couplant comportements volumiques durcissants et conditions de saut décrivant le processus d'endommagement surfacique et de rupture du matériau. De nombreux modèles de zones cohésives ont été proposés dans la littérature pour la simulation de la rupture fragile. En revanche, l'application des modèles de zones cohésives à la simulation de la rupture ductile reste encore un domaine relativement ouvert. Une approche possible consiste à déterminer la loi cohésive à partir du comportement d'un élément de matière représentatif du matériau considéré. Différents auteurs [1, 2, 3] ont ainsi identifié numériquement des lois cohésives sur des simulations du comportement d'une cellule unitaire homogène avec un modèle d'endommagement ductile de type *Gurson*, modèle poro-mécanique [4].

Dans la continuité de ces approches, un modèle *semi-analytique* de zone cohésive pour les matériaux ductiles est développé via une approche micromécanique. L'endommagement ductile est lié à l'évolution des phases poreuses qui induit éventuellement une localisation des déformations plastiques dans une bande avant la rupture finale du matériau. Cette zone de localisation des déformations plastiques précurseur de la rupture ductile est assimilée à une bande cohésive et une loi cohésive est déterminée via une synthèse du modèle d'endommagement ductile volumique de Gurson-Tveergaard-Needleman (GTN) [5] sous forme d'un *comportement surfacique* en exploitant les relations cinématiques de [6]. Ce nouveau modèle de zone cohésive permet d'une part de retrouver avec un bon accord la réponse d'une cellule unitaire avec un comportement de type GTN et d'autre part de prendre en compte l'influence de la direction du chargement au voisinage de la fissure (triaxialité en contrainte ou en déformation) dans le comportement à rupture. L'implémentation numérique de ce modèle de zone cohésive est réalisé dans le cadre d'une formulation éléments finis multicorps [7] dans laquelle la loi cohésive représente une condition aux limites mixte entre éléments finis. La démarche a été appliquée à la simulation d'un essai standard de propagation de fissure et validée par comparaison à des données expérimentales disponibles.

2 Modélisation cohésive de la rupture ductile

2.1 Cinématique de la zone cohésive

Considérons un domaine matériel $\Omega \in \mathbb{R}^3$ de frontière $\partial\Omega$ constitué d'un matériau ductile obéissant à un comportement élastoplastique. Le champ de déplacement dans Ω est désigné \underline{u} . De plus il est supposé que l'état mécanique du matériau se caractérise entre autres par la présence d'une zone de localisation des déformations notée S_h (voir figure 1). Les frontières du domaine S_h qui formeront in fine les lèvres de la fissure admettent la même normale \underline{n} . L'épaisseur h de la bande de localisation est supposée très petite par rapport à la taille du domaine Ω .

Les hypothèses essentielles consistent à :

- considérer que l'endommagement ductile dans le matériau se concentre dans la bande de localisation des déformations. *Le comportement de la bande de localisation est schématisé au moyen du modèle de plasticité poreux (modèle GTN) et les champs mécaniques y sont considérés comme uniformes.* En

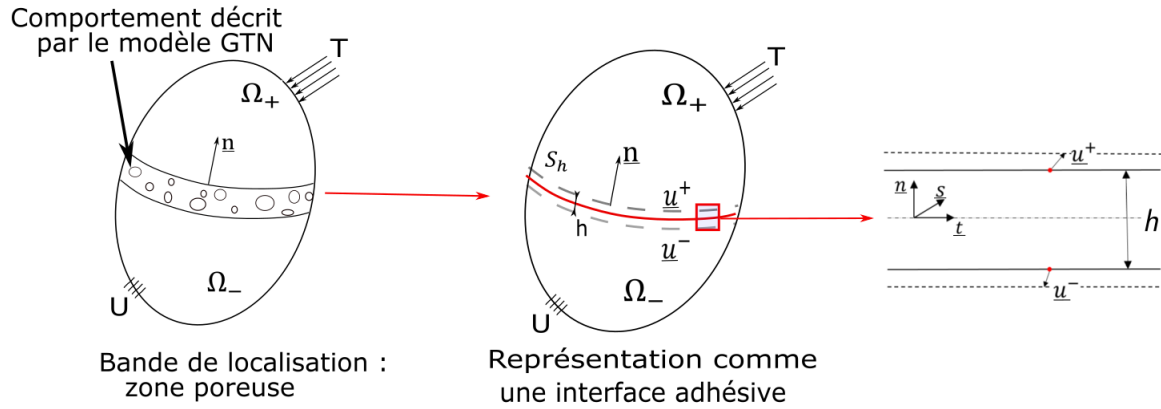


FIGURE 1 – Démarche de modélisation : représentation de la bande de localisation comme une interface adhésive S_h . Définition du repère local normal-tangent $\{\underline{n}, \underline{t}, \underline{s}\}$ dans la bande.

dehors de la bande de localisation, le matériau est sain et obéit à un modèle de plasticité avec critère de Von Mises sans endommagement ;

- idéaliser la bande de localisation S_h comme une interface adhésive entre les domaines Ω^+ et Ω^- (h négligeable devant les dimensions caractéristiques de Ω). Ceci offre la possibilité de modéliser l'émergence d'une fissure dans le matériau ductile par une approche cohésive comme cela est souvent fait dans des problèmes de fissuration de solides adhésifs ([8]). Dans la suite le terme *zone cohésive* fera référence à la bande de localisation.

En désignant par \underline{u}^+ et \underline{u}^- les valeurs respectives du champ de déplacement sur les bords des domaines Ω^+ et Ω^- partagés avec S_h , le saut de déplacement (l'ouverture de fissure) à la traversée de la bande de localisation se définit par :

$$[\underline{u}] = \begin{pmatrix} [u_n] \\ [u_t] \\ [u_s] \end{pmatrix}_{\{\underline{n}, \underline{t}, \underline{s}\}} = \underline{u}^+ - \underline{u}^-.$$

Le taux de déformation dans la bande de localisation (zone cohésive) peut être approché par [8] :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}} &\approx \frac{[\dot{u}] \otimes_s \underline{n}}{h} = \frac{[\dot{u}_i]n_j + [\dot{u}_j]n_i}{2h} \\ \dot{\mathbf{E}} &= \begin{bmatrix} \frac{[\dot{u}_n]}{h} & \frac{[\dot{u}_t]}{2h} & \frac{[\dot{u}_s]}{2h} \\ \frac{[\dot{u}_t]}{2h} & 0 & 0 \\ \frac{[\dot{u}_s]}{2h} & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

Une telle approximation implique que les déformations dans le plan de normale \underline{n} sont négligées.

2.2 Loi de traction-séparation : modèle ZC/GTN

L'équilibre dans Ω implique la continuité du vecteur contrainte à la traversée de la bande de localisation

$$\underline{\text{div}} \underline{\Sigma} = \underline{0} \text{ dans } \Omega \quad \Rightarrow \quad \underline{R}^- = \underline{R}^+ = \underline{R}.$$

La valeur du vecteur contrainte appliquée sur la bande de localisation nécessaire pour provoquer la rupture dans la bande de localisation est l'effort de cohésion.

Il a été présumé que le comportement local dans la bande de localisation du matériau ductile est décrit par le modèle GTN. Le tenseur de contrainte (dont découle le vecteur contrainte) est relié au taux de déformation dans la zone cohésive par les relations du modèle de comportement GTN :

$$\underline{R} = \underline{\Sigma}(\varepsilon([\underline{\dot{u}}]), f) \cdot \underline{n} \quad (2)$$

avec $\underline{\Sigma}$ le tenseur des contraintes macroscopiques correspondant à la surface de charge du modèle GTN et f la porosité. Les contraintes seuil dans le cadre du modèle GTN s'expriment en fonction du taux de déformation par :

$$\begin{cases} \Sigma_m = \frac{2}{3q_2} \sigma_y \left(\operatorname{arcsinh} \left(\frac{2\eta_{\dot{\varepsilon}}}{q_1 f^*} \right) - \operatorname{arcsinh}(2\eta_{\dot{\varepsilon}}) \right) \\ \Sigma_{eq} = \sigma_y \left(\sqrt{1 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} - \sqrt{(q_1 f^*)^2 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

où le paramètre $\eta_{\dot{\varepsilon}}$ est la triaxialité du taux déformation : $\eta_{\dot{\varepsilon}} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{E}_{eq}}$.

$\dot{E}_m = \frac{1}{3} \operatorname{tr} \dot{\mathbf{E}}$, $\dot{E}_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\mathbf{E}}^d : \dot{\mathbf{E}}^d}$ et $\dot{\mathbf{E}}^d = \dot{\mathbf{E}} - \frac{1}{3} \operatorname{tr} \dot{\mathbf{E}} \mathbf{i}$. $\Sigma_m = \frac{1}{3} \operatorname{tr} \underline{\Sigma}$, $\Sigma^d = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\Sigma}^d : \underline{\Sigma}^d}$ et $\underline{\Sigma}^d = \underline{\Sigma} - \frac{1}{3} \operatorname{tr} \underline{\Sigma} \mathbf{i}$. \mathbf{i} est le tenseur identité d'ordre 2. σ_y est la contrainte d'écoulement, q_1 et q_2 sont des paramètres.

Les grandeurs Σ_m et Σ_{eq} étant connues, le tenseur des contraintes seuil se calcule par :

$$\underline{\Sigma} = \Sigma_m \mathbf{i} + \underline{\Sigma}^d \quad \text{avec} \quad \underline{\Sigma}^d = \frac{2 \Sigma_{eq}}{3 \dot{E}_{eq}} \dot{\mathbf{E}}^d.$$

Le vecteur de contrainte cohésive se réduit au produit de la contrainte d'écoulement σ_y à des fonctions \underline{T} du saut de vitesse dans la zone cohésive :

$$\underline{R} = \underline{\Sigma} \cdot \underline{n} = \sigma_y \underline{T}([\underline{\dot{u}}]) \quad (4)$$

où

$$\underline{T}([\underline{\dot{u}}]) = \begin{cases} T_n = \frac{2}{3} \frac{1}{q_2} \left(\operatorname{arcsinh} \left(\frac{2\eta_{\dot{\varepsilon}}}{q_1 f^*} \right) - \operatorname{arcsinh} 2\eta_{\dot{\varepsilon}} \right) + \frac{4}{9} \left(\sqrt{1 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} - \sqrt{(q_1 f^*)^2 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} \right) \frac{1}{\dot{E}_{eq}} \frac{[\dot{u}_n]}{h} \\ T_t = \frac{1}{3} \left(\sqrt{1 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} - \sqrt{(q_1 f^*)^2 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} \right) \frac{1}{\dot{E}_{eq}} \frac{[\dot{u}_t]}{h} \\ T_s = \frac{1}{3} \left(\sqrt{1 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} - \sqrt{(q_1 f^*)^2 + (2\eta_{\dot{\varepsilon}})^2} \right) \frac{1}{\dot{E}_{eq}} \frac{[\dot{u}_s]}{h} \end{cases},$$

avec

$$\dot{E}_{eq} = \frac{2}{3h} \left([\dot{u}_n]^2 + \frac{3}{4} [\dot{u}_t]^2 + \frac{3}{4} [\dot{u}_s]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{et} \quad \eta_{\dot{\varepsilon}} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{E}_{eq}} = \frac{[\dot{u}_n]}{2 \left([\dot{u}_n]^2 + \frac{3}{4} [\dot{u}_t]^2 + \frac{3}{4} [\dot{u}_s]^2 \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Évolution de la variable d'endommagement f^*

Conformément au modèle GTN, l'évolution de la porosité est décrite par :

$$\begin{aligned} \dot{f} &= \dot{f}_g + \dot{f}_n \\ \text{avec} \quad \dot{f}_g &= (1 - f) \operatorname{tr} \dot{\mathbf{E}} \quad \text{et} \quad \dot{f}_n = A \dot{\varepsilon} \end{aligned} \quad (5)$$

où \dot{f}_g est le taux de croissance des cavités déduite du bilan de masse et \dot{f}_n le taux de porosité lié à une nucléation contrôlée par une déformation "moyenne" $\bar{\varepsilon}$. Le taux de déformation dans cette formulation étant défini par la cinématique dans la bande cohésive (1).

Comme suggéré par [9], la nucléation de nouvelles cavités peut être gouvernée par une loi normale :

$$A(\bar{\varepsilon}) = \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\varepsilon} - \epsilon_N}{s_N} \right)^2 \right] \quad (6)$$

où f_N représente la fraction volumique des inclusions, ϵ_N un paramètre de nucléation en déformation et s_N l'écart type.

La porosité effective s'exprime par :

$$f^* = \begin{cases} f & \text{si } f \leq f_c \\ f_c + k(f - f_c) & \text{si } f \geq f_c \end{cases} \quad (7)$$

avec f_c et k des paramètres matériaux.

Ecrouissage et nucléation

L'introduction de l'écrouissage dans le modèle cohésif se fait également selon cette l'approche proposée par [4], à la différence que la dissipation macroscopique est évaluée avec la définition du tenseur du taux de déformation dans la zone cohésive adoptée en (1). La dissipation macroscopique dans la zone cohésive vaut donc :

$$\Sigma : \dot{\mathbf{E}} = (1 - f)\sigma_y \dot{\bar{\epsilon}} \Rightarrow \dot{\bar{\epsilon}} = \frac{1}{1 - f} \frac{T \cdot [\dot{u}]}{h} \quad (8)$$

La relation (8) vient de :

$$\begin{aligned} \Sigma : \dot{\mathbf{E}} &= \Sigma_{ij} \dot{\mathbf{E}}_{ij} \quad (\text{où } \dot{\mathbf{E}}_{ij} = \frac{[\dot{u}_i] \otimes_s n_j}{h}) \\ &= \frac{\Sigma_{ij} n_j [\dot{u}_i] + \Sigma_{ij} n_i [\dot{u}_j]}{2h} \\ \Sigma : \dot{\mathbf{E}} &= \frac{R_i [\dot{u}_i]}{h} = \frac{\sigma_y T_i [\dot{u}_i]}{h} \quad (\text{symétrie de } \Sigma) \end{aligned}$$

Il est à noter par ailleurs que la loi d'évolution de la déformation "moyenne" $\bar{\epsilon}$ (8) ne dépend pas de σ_y et reste par conséquent valable pour toute loi d'écrouissage $\sigma_y(\bar{\epsilon})$.

2.3 Prise en compte de l'état du chargement

Un certain nombre d'investigations ont montré que le trajet du chargement a une influence significative sur le comportement à rupture d'un matériau ductile [10]. L'une des limitations des modèles de zones cohésives est qu'ils ne peuvent intrinsèquement pas parcourir tous les états de chargements (par exemple, les hautes triaxialités des contraintes ne peuvent pas être atteintes). Cette limitation provient de la cinématique réduite (1) définissant le tenseur de taux de déformation dans la bande de localisation (dans laquelle il n'existe pas de déformation dans le plan). L'hypothèse d'un état de chargement dans la zone cohésive proche de son voisinage est retenue. De fait, l'information sur l'état du chargement est prise sur les mailles volumiques voisines de la zone cohésive et est introduite comme une variable interne dans les modèles de zones cohésives.

Il est proposé un enrichissement du taux de déformation dans la zone cohésive de la forme suivante :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{E}} &= \frac{[\dot{u}] \otimes_s n}{h} + \dot{\gamma} \underline{t} \otimes_s \underline{t} + \dot{\gamma} \underline{s} \otimes_s \underline{s} \\ \dot{\mathbf{E}} &= \begin{bmatrix} \frac{[\dot{u}_n]}{h} & \frac{[\dot{u}_t]}{2h} & \frac{[\dot{u}_s]}{2h} \\ \frac{[\dot{u}_t]}{2h} & \dot{\gamma} & 0 \\ \frac{[\dot{u}_s]}{2h} & 0 & \dot{\gamma} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

où $[\dot{u}] = \{[\dot{u}_n], [\dot{u}_t], [\dot{u}_s]\}$ est le vecteur saut de vitesse qui permet de décrire la cinématique physique de la zone cohésive. γ est une variable interne ad-hoc introduite pour améliorer la prise en compte de l'état du chargement dans le modèle de zone cohésive.

L'évolution de $\dot{\gamma}$ est régie par l'état du chargement hors de la zone cohésive et les champs cinématiques $[\dot{u}]$ dans la zone cohésive (voir figure 2).

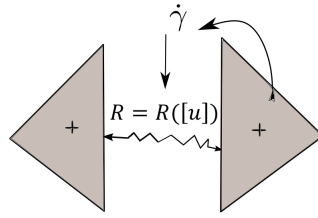


FIGURE 2 – Transmission de l'information sur l'état du chargement de la maille volumique vers la zone cohésive.

Plusieurs choix sont possibles pour caractériser l'état du chargement et dépendent de la modélisation. Par exemple, il est possible de considérer que :

- la triaxialité des contraintes dans la zone cohésive η_σ est égale à celle du domaine volumique voisin de la zone cohésive η_σ^{vol} .

$$\dot{\gamma} \text{ est alors solution de } \eta_\sigma = \eta_\sigma^{vol}, \text{ soit } \dot{\gamma} = F([\underline{u}], \eta_\sigma^{vol})$$

- la direction du taux de déformations de la zone cohésive η_ε est égale à celle du domaine volumique voisin de la zone cohésive η_ε^{vol} .

$$\dot{\gamma} \text{ est solution de } \eta_\varepsilon = \eta_\varepsilon^{vol}, \text{ soit } \dot{\gamma} = F([\underline{u}], \eta_\varepsilon^{vol})$$

Les formulations présentées ci-dessus ne sont pas exhaustives au sens où d'autres variables peuvent être envisagées pour la caractérisation de l'état du chargement selon la modélisation.

La loi de traction-séparation $\underline{R} = \sigma_y \underline{T}([\underline{u}], \dot{\gamma})$ prenant en compte l'état du chargement est déterminée selon la même méthodologie présentée dans la section précédente avec la nouvelle cinématique (9).

2.4 Irreversibilité et décharge

Le modèle de zone cohésive défini jusqu'à présent est réversible. Le processus d'élaboration d'une fissure étant irréversible, il convient de définir :

- un critère de décharge,
- un comportement en décharge (tenant compte de l'irréversibilité).

Le choix d'un traitement séparé de la décharge suivant les différentes directions est retenu et le critère proposé pour évaluer une situation de décharge s'écrit :

$$|[u_i]^{(t)}| - |[u_i]^{(t-dt)}| \begin{cases} < 0, & \text{(décharge suivant } i) \\ \geq 0, & \text{(charge suivant } i) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{avec } i = \{\underline{n}, \underline{t}, \underline{s}\}$$

En cas de décharge, il est fait de manière heuristique le choix que la décharge s'effectue de manière *élastique linéaire vers l'origine* (voir figure 3).

$$R_i = \frac{R_i([\underline{u}]_{max})}{[u_i]_{max}} [u_i] \quad \text{avec } i = \{\underline{n}, \underline{t}, \underline{s}\} \quad (11)$$

où $[u_i]_{max}$ est le vecteur qui contient les plus grandes valeurs atteintes en valeur absolue par le saut de déplacement suivant les différentes directions $\{\underline{n}, \underline{t}, \underline{s}\}$.

3 Simulation représentative

3.1 Mise en œuvre numérique

Les modèles de zones cohésives peuvent être implémentés dans le cadre des éléments finis, soit par l'utilisation d'éléments surfaciques (communément dénommés "éléments cohésifs") entre les éléments volumiques, soit

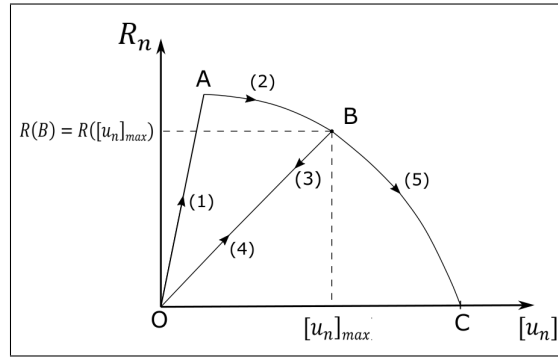


FIGURE 3 – Illustration du principe de décharge suivant le mode normal. (1) : charge initiale, (2) : charge (endommagement), (3) : décharge, (4) : recharge, (5) : charge (endommagement)

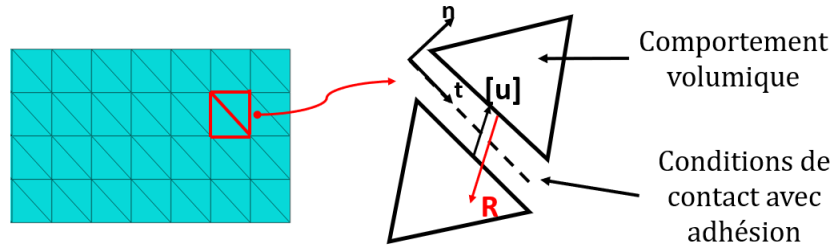


FIGURE 4 – Approche cohésive-volumique : modèle de zone cohésive en conditions mixte entre éléments.

comme des conditions mixtes d'interactions entre les éléments volumiques. La deuxième approche est utilisée dans le cadre d'une approche multi-corps. Dans ce formalisme, chaque maille ou groupe de mailles peut être considéré comme un corps indépendant et relié aux autres corps par des relations surfaciques de type conditions aux limites mixtes (voir figure 4).

Le modèle de zone cohésive est introduit dans une formulation de contact avec adhésion entre éléments [11] :

$$R_n^c + R_n \geq 0, \quad [u_n] \geq 0, \quad (R_n^c + R_n)[u_n] = 0 \quad (\text{condition de Signorini})$$

$$\|\underline{R}_T^c + \underline{R}_T\| \leq \mu(R_n^c + R_n) \quad (\text{condition de frottement de Coulomb})$$

$$\text{avec} \quad \begin{cases} \|\underline{R}_T^c + \underline{R}_T\| < \mu(R_n^c + R_n) \Rightarrow [\underline{u}_T] = 0 \\ \|\underline{R}_T^c + \underline{R}_T\| = \mu(R_n^c + R_n) \Rightarrow \exists \alpha \geq 0, [\underline{u}_T] = -\alpha(\underline{R}_T^c + \underline{R}_T) \end{cases}$$

où $\underline{R}^c = R_n^c \underline{n} + \underline{R}_T^c$ est la contrainte de contact, \underline{R} l'effort de cohésion et μ le coefficient de frottement de Coulomb. La résolution numérique est faite au moyen d'un algorithme de dynamique non régulière des contacts (Non-Smooth Contact Dynamics ou NSCD).

Quelques adaptations du modèle de zone cohésive ont été réalisées pour la mise en œuvre numérique :

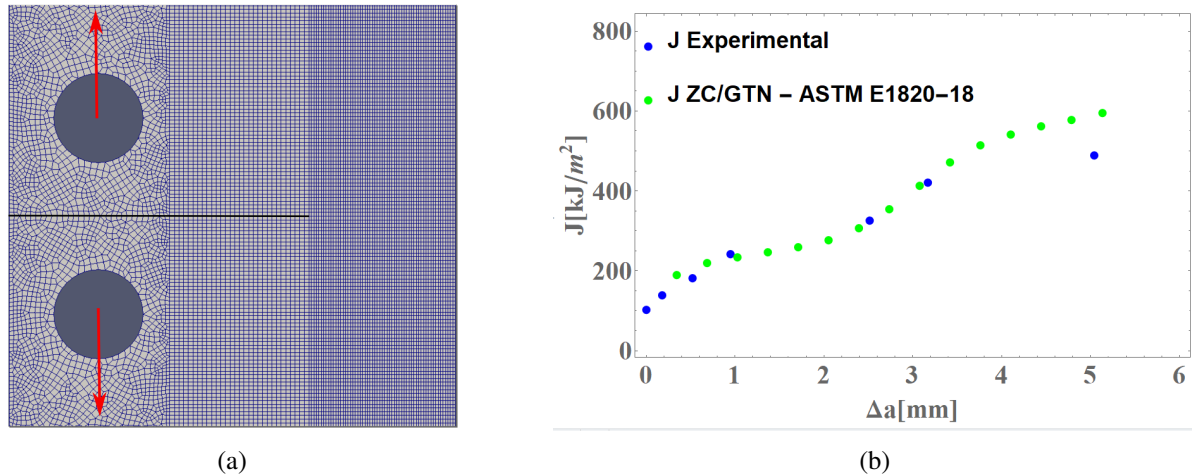
- la formulation d'une approximation analytique du modèle ($\underline{R}([\underline{u}])$ au lieu de $\underline{R}([\underline{\dot{u}}])$) sous l'hypothèse de chargements radiaux en déformation. Ceci nécessite en outre une expression analytique de $\bar{\varepsilon}([\underline{u}])$ et $f^*([\underline{u}])$. L'état du chargement est caractérisé par la direction des déformations donnée par η_ε (la triaxialité des déformations) récupérée sur le point de Gauss (maille volumique) le plus proche du point de contact considéré ;
- l'introduction d'une raideur initiale finie au modèle pour l'obtention d'une loi de traction-séparation **intrinsèque**.

3.2 Application : simulation d'un essai de ténacité C(T)

Les résultats numériques de simulation présentés dans cette section ont été obtenus en utilisant le code de calcul LMGC90 [12]. Un essai de type C(T) de propagation d'une fissure utilisé pour évaluer la ténacité des

Constantes élastiques	Y	ν						
Valeurs	210 GPa	0.3						
Paramètres plastiques	σ_0	K	n					
Valeurs	470 MPa	35.0	4.5					
Paramètres GTN	q_1	q_2	f_0	k	f_c	f_N	ϵ_N	s_N
Valeurs	1.5	1.0	0.0025	3.4	0.021	0.02	0.3	0.1

TABLEAU 1 – Paramètres matériaux acier StE460 [2]

FIGURE 5 – (a) Maillage. (b) Courbe de résistance $J - \Delta a$ expérimentale et numérique

matériaux est analysé. Le matériau d'étude est un acier ferritique de désignation StE 460 (désignation allemande). Ce matériau a été testé à la "German Federal Institute of Materials" et les paramètres GTN identifiés pour ce matériau ainsi que des données d'essais expérimentaux sont reportés dans plusieurs travaux [2, 3]. Les propriétés matériaux sont essentiellement de deux classes :

- les paramètres caractérisant le comportement élastoplastique du matériau ;
- les paramètres d'évolution d'endommagement du modèle GTN.

Une variante du modèle de Swift est utilisé pour modéliser l'écroutissement du matériau :

$$\sigma_y = \sigma_0(1 + K\bar{\epsilon})^{\frac{1}{n}}$$

L'ensemble des valeurs des paramètres est présenté dans le tableau 1.

Les simulations sont réalisées en 2D dans l'hypothèse des déformations planes. La taille de la bande de localisation (taille de la zone cohésive) h est prise égale 400 μm , ordre de grandeur du paramètre d'échelle utilisé pour simuler la rupture dans cet acier ferritique [2]. Les dimensions de l'éprouvette sont : $W = 50 mm$, $a_0/W = 0.59$ (dans la norme ASTM [13]).

Les courbes de résistance numériques $J - \Delta a$ (caractérisant le taux de restitution de l'énergie de déformation pour différents incréments de fissure) ont été déterminées en utilisant la méthode " $\eta - factor$ " développée dans [13].

La comparaison de la courbe expérimentale $J - \Delta a$ et celle prédite par la simulation numérique (voir figure 5b) montre une assez bonne cohérence et permet de valider en première approximation l'approche développée dans ce travail dans le cadre de la réalisation de prédictions quantitatives.

4 Discussion et conclusion

Ce travail aborde la thématique de la modélisation de l'initiation et de la propagation de fissure dans un matériau ductile, au moyen d'une approche cohésive-volumique. L'approche développée met en œuvre la modélisation de

la bande de localisation des déformations plastiques précurseur à la rupture ductile comme une zone cohésive permettant une transition progressive d'un milieu continu vers un milieu présentant une discontinuité. La loi de traction-séparation qui décrit le comportement dans la zone cohésive est développée sur la base du comportement d'un élément de matière poreux. La démarche a été appliquée à la simulation d'un essai classique de propagation de fissure et à permis d'illustrer la pertinence de l'approche pour la simulation de la propagation d'une fissure dans un matériau ductile dans le voisinage d'un défaut où l'état du chargement peut influencer sur le comportement à rupture.

La démarche peut être approfondie par la détermination du modèle de zone cohésive sur des modèles de comportement plus sophistiqués (avec viscosité, prise en compte de l'endommagement à faibles triaxialités) ou encore par une caractérisation de l'état du chargement par plusieurs paramètres (via par exemple de la prise en compte de manière simultanée de la triaxialité des contraintes et du paramètre de Lode).

Références

- [1] V. Tvergaard and J.W. Hutchinson. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 40 :1377–1397, 1992.
- [2] T. Siegmund and W. Brocks. A numerical study on the correlation between the work of separation and the dissipation rate in ductile fracture. *International Journal of Fracture*, 99 :97–116, 1999.
- [3] I. Scheider. Prediction of the Work of Separation and Implications to Modeling. *Engineering Fracture Mechanics*, 76 :1450–1459, 2009.
- [4] A. L. Gurson. Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth : Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99 :2–15, 1977.
- [5] V. Tvergaard and A. Needleman. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, 32 :157–169, 1984.
- [6] P. M. Suquet. Discontinuities and Plasticity *Nonsmooth Mechanics and Applications*, 279–340, 1988.
- [7] F. Perales, F. Dubois, Y. Monerie, B. Piar, L. Stainier. A NonSmooth Contact Dynamics-based multi-domain solver. *European Journal of Computational Mechanics*, 279–340, 1988.
- [8] J-C. Michel, P. Suquet, F. Thébaud. Une modélisation du rôle des interfaces dans le comportement des composites à matrice métallique. *Revue Européenne des Éléments Finis*, 3 :573–595, 1994.
- [9] C.C. Chu and A. Needleman. Void Nucleation Effects in Biaxially Stretched Sheets. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 102 :249–256, 1980.
- [10] Y. Bao and T. Wierzbicki. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46 :81–98, 2004.
- [11] V. Acary and Y. Monerie. Nonsmooth fracture dynamics using a cohesive zone approach. <https://hal.inria.fr/inria-00110560>, 2003.
- [12] F. Dubois, J. Michel, M. Renouf, R. Mozul, A. Martin, M. Bagneris. LMGC90. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00596875>, 2011.
- [13] ASTM E1820-18, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. *ASTM International*.