

Interaction flambage - rupture : Approche expérimentale et numérique

D. Cuong¹, A. Limam², A. Combescure³

¹ LGCIE, INSA Lyon, France, Dinh-cuong.tran@insa-lyon.fr

² LGCIE, INSA Lyon, France, Ali.limam@insa-lyon.fr

³ LAMCOS, INSA Lyon, France, Alain.combescure@insa-lyon.fr

Ce travail présente des essais et des simulations numériques concernant le problème du « splitting » ou déchirure de tubes métalliques. Il est constaté expérimentalement, que lorsqu'une fissure propage, générant ainsi l'ouverture d'un tube, des ondulations ou ondes de flambage apparaissent sur les bords libres des lèvres de fissure. Dans ce travail, nous caractérisons le comportement à l'échelle du front de fissure permettant ainsi de cerner la propagation, ainsi que la réponse globale de la structure en particulier à l'aval de la fissure, afin d'expliquer l'apparition des ondes de flambage. La modélisation numérique, dont les ingrédients non linéaire traitent du contact, de la plasticité, de la rupture et du flambage, est abordée en combinant des éléments massifs, des éléments de coques et des éléments cohésifs, elle aboutit à une assez bonne corrélation avec les observations expérimentales.

Mots clés : Tube métallique, rupture ductile, flambage, élément cohésif

1. Introduction

Lorsqu'on découpe un feuillard à l'aide d'un outil, ou lorsqu'on découpe un tube selon son axe, au fur et à mesure que l'on propage la fissure qui traduit la découpe il arrive que des ondulations de flambage perturbent les deux bords libres générés par la propagation de la fissure. Afin de comprendre les origines de ce comportement, nous avons mené une campagne expérimentale, dans laquelle des tubes en acier inox sont « découpés » selon une génératrice. Une instrumentation adéquate, couplant des mesures ponctuelles, à l'aide de jauges de déformation, et une méthode champ, par corrélation d'image, nous a permis de correctement mettre en exergue la phénoménologie, en particulier les cinématiques induites à l'échelle géométrique de la fissure (front de fissure) ainsi qu'à l'échelle du tube, avec les longueurs d'onde de flambage observées à l'aval de la fissure. Différentes géométries de tubes (Rayon/épaisseur) ont été testées. La modélisation numérique menée en non linéaire géométrique (flambage) et matériau (déchirure ductile) est aussi abordée, le couplage d'éléments massifs et d'éléments coques ainsi que l'utilisation d'éléments cohésifs pour la gestion de la propagation de fissure permettent de corroborer les observations expérimentales. L'hypothèse d'une propagation de fissure essentiellement en mode I est faite, et sachant la difficulté d'obtenir expérimentalement sur des tôles minces, l'énergie de rupture ainsi que la contrainte maximale cohésive, les paramètres matériau gérant la fissuration au sein des éléments cohésifs sont obtenus par recalage numérique. Ces études montrent que l'augmentation de la charge inhérente au déplacement de l'outil de « découpe », induit une extension dans la direction circonférentielle qui induit une striction dans la direction radiale amenant finalement la rupture. Lors de la rupture, un « sillage plastique » apparaît, relativement large, près et parallèle aux bords de la fissure. « Bloquer » par les autres parties du tube qui restent élastiques, des contraintes de compression axiale résiduelles apparaissent dans ce sillage plastique, à l'aval de la fissure, leur intensité est suffisante pour produire l'ondulation des bords qui traduit un flambage local.

2. Expérimentation

2.1. Programme expérimental

Des essais de « splitting » ou déchirure de tubes en acier inox 304L, sont menés en quasi-statique. Deux géométries sont ici étudiées, de diamètre 50mm, respectivement 48.3mm, et d'épaisseur 1.5mm, respectivement 2mm. Un cône asymétrique, jugé très rigide au regard du tube, est translaté dans le tube le long de son axe de symétrie, afin de produire une propagation de fissure. Le diamètre maximal du cône est positionné en vis-à-vis d'une entaille ou fissure initiale pratiquée sur une génératrice du tube. Le déplacement du cône est assuré par une barre d'acier cylindrique relié à un servo-vérin hydraulique. Durant le test, une des extrémités du tube est fixe, le cône est positionné à l'autre extrémité puis translaté à vitesse constante (5mm/mn). Le parcours du cône est de 250mm, la longueur du tube de 300mm. Deux configurations de lubrification sont étudiées, celle d'un contact sec, non lubrifiée, et celle où la surface est préalablement graissée.

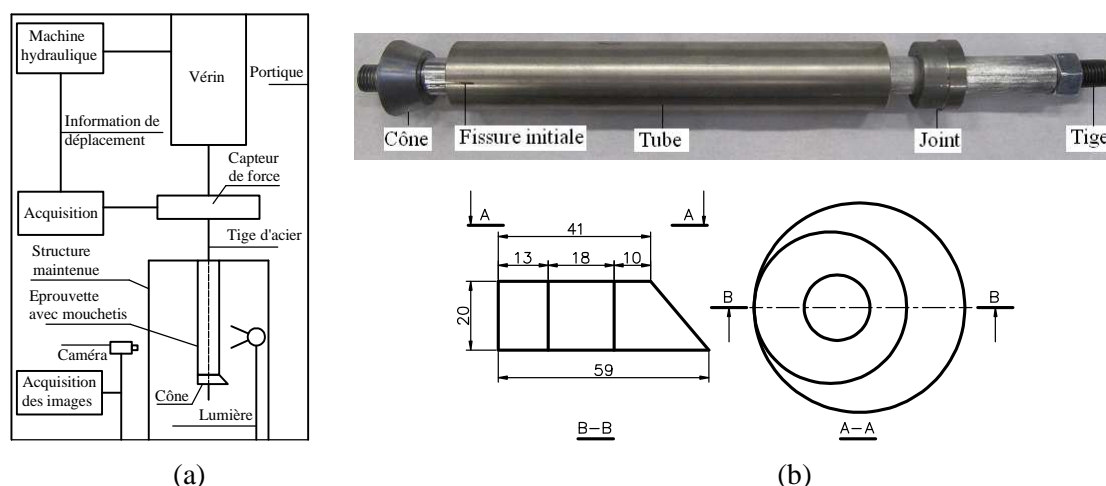


FIG. 1. Banc d'essai, (a) Schéma global, (b) Tube, Cône, Joint, Tige et dimension du cône (mm)

Une entaille initiale de longueur 20mm, de largeur 2mm et de forme en V en fond d'entaille, est créée à une extrémité du tube le long d'une génératrice situé à l'opposé du joint de soudure présent sur les tubes inox. Le comportement du matériau est caractérisé via des essais de traction uni-axiale effectués à température ambiante et réalisés sur des éprouvettes découpées selon la direction axiales des tubes. Les essais sont pilotés en déplacement à une vitesse constante 1,2mm/minute et sont instrumentés à l'aide de jauges grandes déformations couplés à l'extensométrie optique.

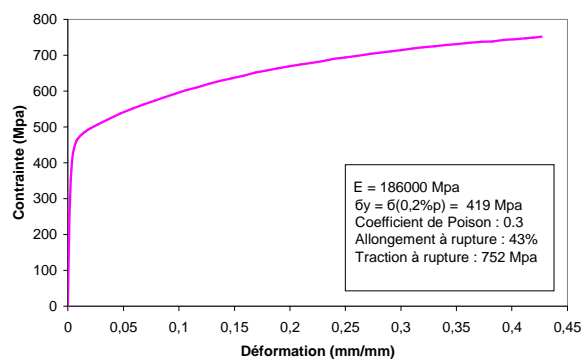


FIG. 2. Courbe de comportement du matériau inox 304L

2.2. Résultats

2.2.1. Déformée du tube

A l'aval de la fissure qui propage, nous constatons l'apparition d'ondulations sur les bords libres des deux lèvres de la fissure, le mode est parfois symétrique, parfois un déphasage des ondes apparaît dès la première ondulation.

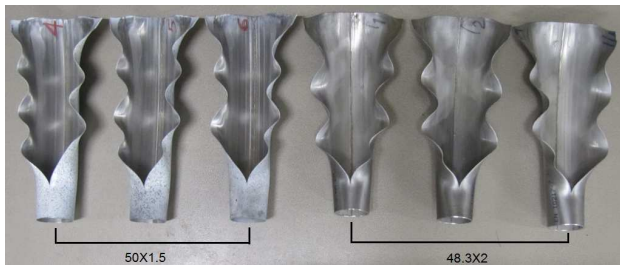


FIG. 3. Déformée des tubes pour différents D/t

Pour mieux appréhender le comportement ondulant des bords libres, on a effectué une mesure, via des jauges permettant la mesure des grandes déformations, de la déformation longitudinale en un point situé à 150mm de l'extrémité encastree et sur une génératrice située à 30° de celle où propage la fissure. La méthode de corrélation d'images est utilisée pour mesurer les champs de déplacement à l'aide du système VIC3D. Une déflexion en creux est constatée en front de fissure ainsi qu'une forte variation de la déformation au voisinage immédiat du fond de fissure.

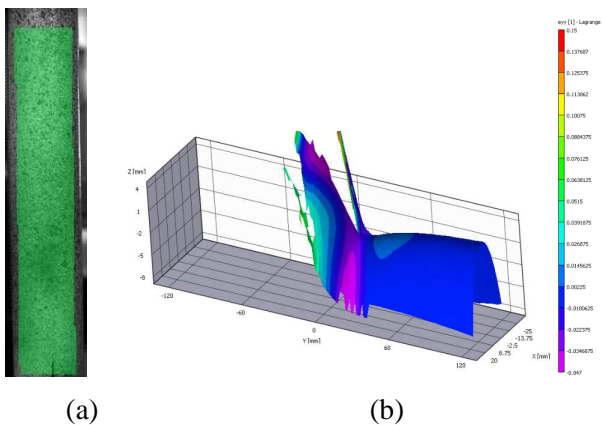


FIG. 4. Etat de déformation axiale à la position du cône y=150mm, (a) Zone étudiée, (b) ϵ_{yy}

2.2.2. Courbe force – déplacement

La figure 5 visualise les différentes courbes force/déplacement du cône pour différentes géométries.

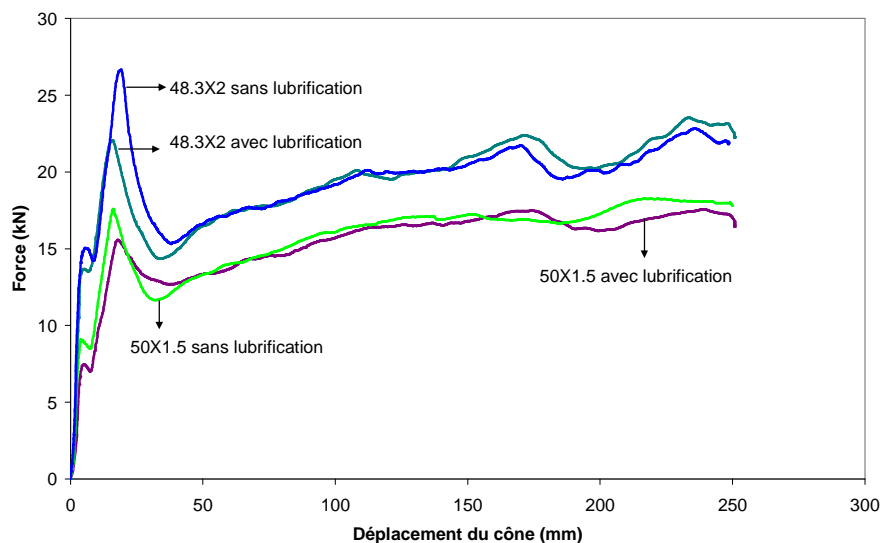


FIG. 5. Courbe force – déplacement du cône pour différents D/t

La combinaison de la pression et du frottement sur la surface de contact est tel que le lubrifiant tend à être décapé de la surface interne du tube de sorte que le tube et le cône semblent secs après l'essai. Nous constatons que la lubrification n'influence que les premiers parcours du cône où l'état de contact n'est pas encore stable. La courbe de comportement peut-être divisée en trois étapes (figure 6), dont deux premières peuvent être qualifiées d'instables ou de transitoires, la troisième plus stable, exprime un contact permanent entre le tube et le cône. Durant la première étape, seul le bord d'attaque du tube est en contact avec le cône. La phase de décharge est une conséquence des grands changements de géométrie et de la variation de l'angle de contact au bord d'attaque. Une seconde décharge se produit pendant l'étape 2, pour laquelle, le bord d'attaque n'est plus en contact avec le cône. Elle est due à la combinaison de la flexion, le changement de la surface de contact et la propagation de fissure qui entraîne une chute de la rigidité de la structure et favorise donc la déformation du tube.

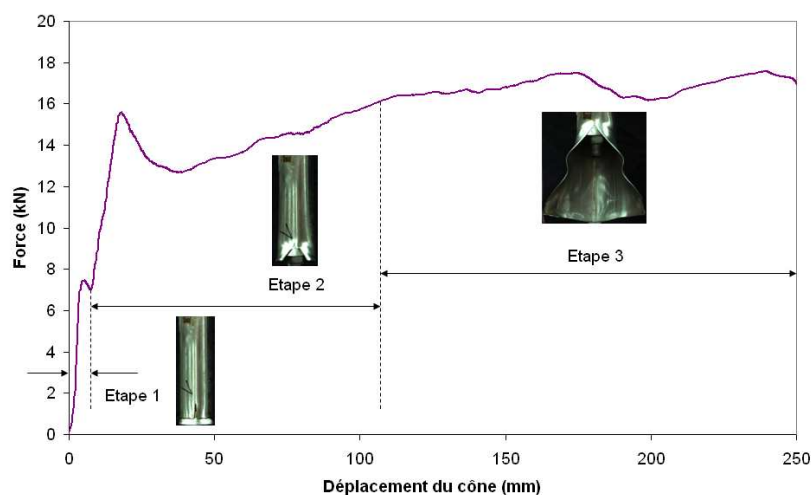


FIG. 6. Les différentes zones de comportement et déformée associée (tube 50X1.5 avec lubrification)

3. Modélisation

3.1. Introduction

Pour mieux analyser ce qui se passe (cinématiques et contraintes) dans les différentes zones du tube, en particulier en fond de fissure, à l'aval sur les bords libres ou lèvres de la fissure et dans leurs voisinages, nous avons développé un modèle numérique à l'aide du code Abaqus. Assumant que seule la fissure initiale propage le long de sa direction initiale sans bifurcation de parcours, un élément d'interface est formulé et implanté via la subroutine UEL. Le comportement du matériau est supposé homogène et isotrope.

3.2. Modèle cohésif

L'interface a une épaisseur nulle et connecte les éléments adjacents. Lorsque la charge augmente, l'endommagement peut s'initier et se propager aux éléments d'interface.

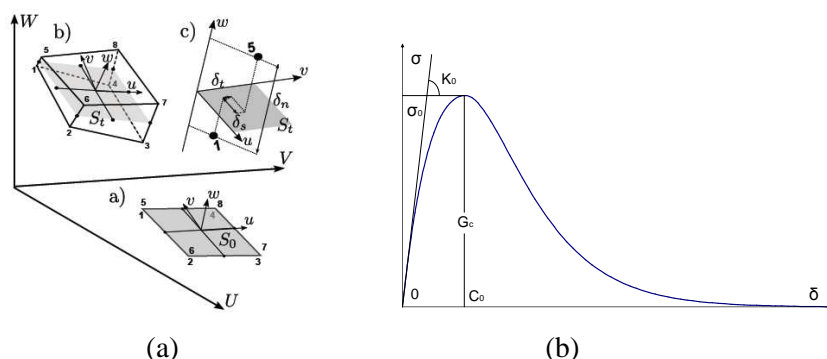


FIG. 7. Zone d'interface plane, (a) Type d'élément, (b) Loi cohésive

L'élément utilisé se compose de 8 nœuds avec 3 degrés de liberté par nœuds, il est donc compatible avec les éléments volumiques linéaires ou les éléments de coque volumique linéaire (solid shell element). A la configuration initiale, les 4 nœuds supérieurs coïncident respectivement avec les 4 nœuds inférieurs, lorsque la traction est active, les nœuds se séparent suivant la loi cohésive. L'élément est jugé rompu quand la traction s'annule. La formulation de l'élément cohésif 3D permet l'étude en grand déplacement et grande rotation [2]. L'intégration numérique est faite suivant le schéma de Newton-Cotes, avec 4 points d'intégration. En adéquation avec l'hypothèse d'une rupture essentiellement en mode I, les termes de couplage dans la matrice de rigidité locale sont supposés nuls. Les termes diagonaux des modes II et III sont choisis non nuls pour éviter la singularité numérique. Ces termes n'influencent pas le résultat du calcul. Vue la symétrie du problème, le plan de référence de l'élément cohésif doit se trouver sur le plan de symétrie et les modes II et III sont bloqués. Parmi les lois constitutives proposées pour décrire la relation entre la contrainte σ et la séparation δ , la forme exponentielle est adoptée:

$$\sigma = \begin{cases} K_0 \delta e^{-\delta/c_0} & \text{si } \delta \leq c_0 \\ \sigma_0 [1 + \beta(\delta - c_0)] e^{-\beta(\delta - c_0)} & \text{si } \delta > c_0 \end{cases} \quad (1)$$

Les constantes c_0 , β sont calculées à partir des données de la rigidité initiale K_0 de la contrainte maximale σ_0 , et de l'énergie cohésive G_c . La valeur K_0 doit être assez grande pour assurer la liaison parfaite entre les éléments avant l'initialisation de l'endommagement mais suffisamment petite pour éviter le problème numérique.

3.3. Simulation de la déchirure

Considérant les conditions de symétrie, une moitié de tube est maillée (figure 8). Le cône est modélisé par les éléments rigides R3D4. Le tube est encastré à sa base ($y = 0$), le maillage à l'aide des « solid shell element » comporte trois zones de différente densité. Le contact est défini entre la surface esclave (peau intérieure du tube) et la surface maître (peau extérieure du cône). La taille minimale des éléments cohésifs est de $0.356 \times 0.5 \text{ mm}$ avec 4 éléments selon l'épaisseur du tube.

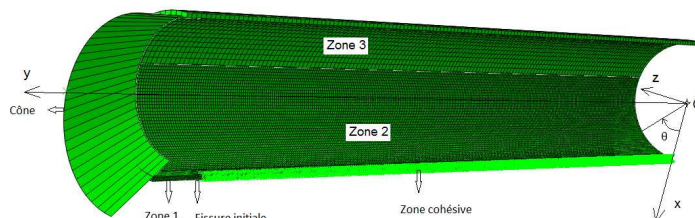


FIG. 8. Maillage adopté

Vu le maillage adopté (moitié d'un tube et respect de la symétrie), l'énergie cohésive est la moitié de la valeur réelle et la rigidité est doublée par rapport à un élément complet. Un amortissement est utilisé pour passer les difficultés de convergence du calcul, il consiste à conditionner la matrice de rigidité tangente (partie relative à l'adoucissement du matériau) pour des incréments de temps suffisamment petits. L'utilisation d'une viscosité $\mu = 10^{-6}$ permet d'accélérer les calculs sans influencer la réponse. Les calculs sont menés pour les deux configurations géométriques (rapport D/t) et selon deux configurations de lubrification, l'une sans frottement, l'autre avec un coefficient de frottement de 0.15. Les paramètres choisis pour l'élément d'interface sont : $K_0 = 1e+5 \times E$ (Mpa/mm) (E module d'Young du matériau), $\sigma_0 = 1450 \text{ Mpa}$, $1/2G_c = 200 \text{ mJ/mm}^2$. Le premier calcul est réalisé à l'aide des éléments SC8R utilisés pour les trois zones. Le résultat colle assez bien à l'expérimentation, le frottement influence fortement la courbe traduisant le comportement global, mais très peu le mode de flambage du tube (figure 9).

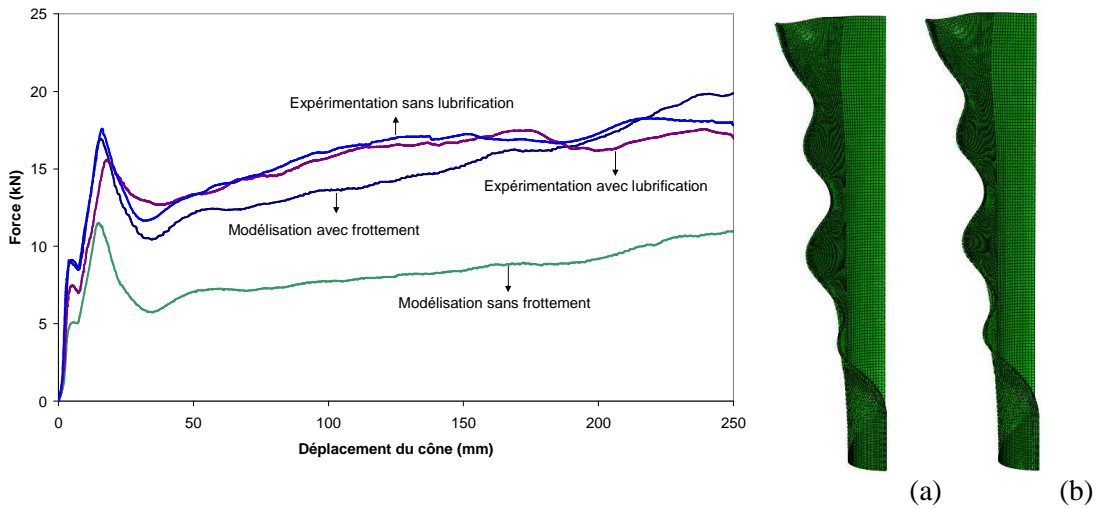


FIG. 9. Résultats pour le tube 50X1.5, (a) Avec frottement, (b) Sans frottement

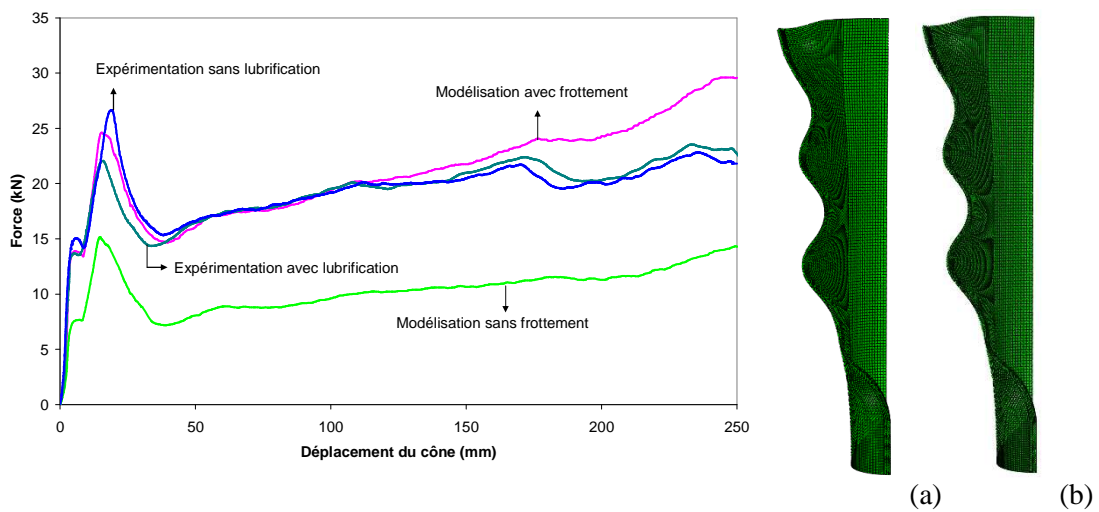


FIG. 10. Résultat pour le tube 48.3X2, (a) Avec frottement, (b) Sans frottement

Ci-dessous, la déformation axiale à la position $y = 150\text{mm}$:

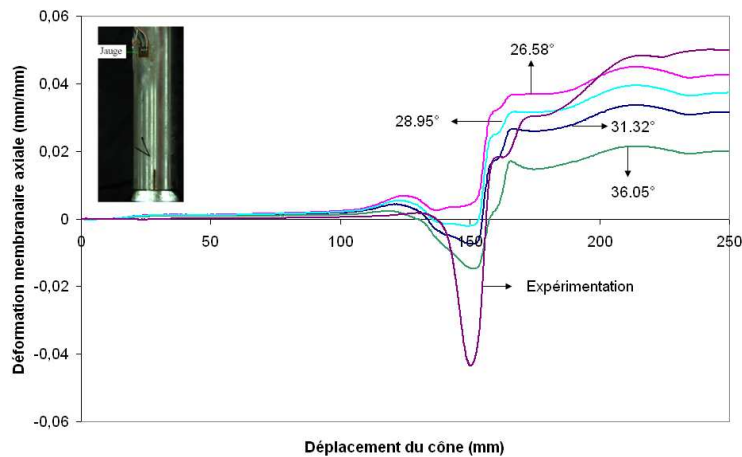


FIG. 11. Déformation de membrane axiale en différents points en fonction du déplacement du cône

Pour jauger de la performance de différents types d'éléments, nous avons effectué différentes simulations où la taille des éléments est préservée. Trois cas ont été considérés, l'un décrit ci-dessus utilise les éléments de coque solide SC8R, le deuxième combine les éléments massifs C3D8I dans la zone 1, et SC8R dans les zones 2 et 3, le troisième modèle ne comprend que des éléments massifs C3D8I.

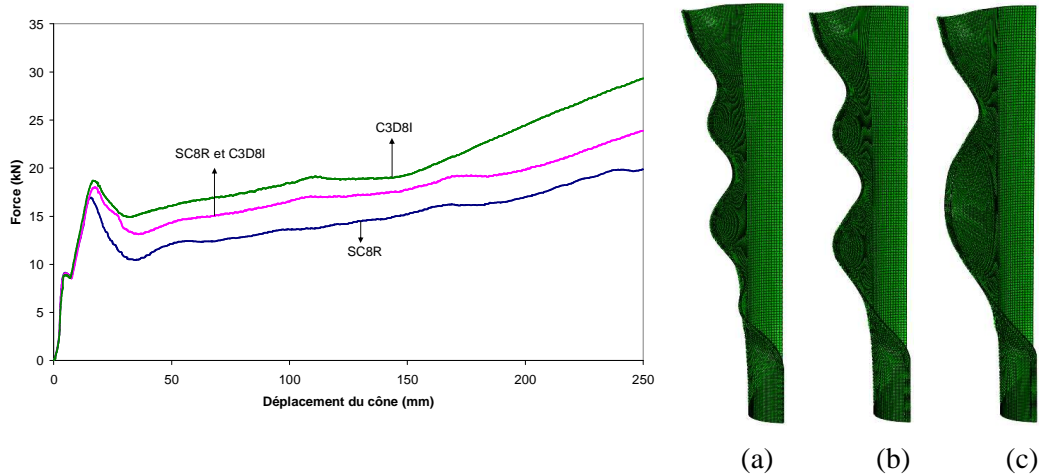


FIG. 12. Résultats (tube 50X1.5) en fonction des éléments utilisés
 (a) SC8R, (b) SC8R et C3D8I, (c) C3D8I

Les trois cas donnent un comportement identique pour ce qui est de la première phase, cependant les pics d'effort se différencie, ensuite, les courbes sont presque parallèles. Les éléments de coque volumiques semblent plus souples que les éléments massifs, par rapport à l'expérimentation, si l'on considère la déformée, la configuration avec l'élément SC8R donne les meilleurs résultats. Pour les éléments volumiques, l'augmentation de la densité de maillage est certainement nécessaire pour mieux capturer les ondulations.

3.4. Mécanisme produisant le flambage

Le tube de diamètre 50mm et d'épaisseur 1.5mm, dans la configuration avec frottement, est ici analysé en détail. L'analyse de la déformation (Figure 13, Figure 14), des flux de contraintes Figure 15, Figure 16) de membrane à la section $y = 150\text{mm}$ nous renseignent sur la déformée du tube. La génératrice $\theta = 0^\circ$ correspond à la lèvre de fissure. Lorsque le cône s'approche et passe la section étudiée, les zones près de la lèvre de fissure plastifient, la déformation axiale domine l'état de déformation membranaire. Au niveau des flux de contraintes, la traction dans les deux directions axiale et circonférentielle est constatée en fond de fissure. Nous constatons une forte variation d'épaisseur dans les zones étirées. Une bande à l'aval du fond de fissure, est comprimée avec des valeurs de contraintes assez grandes, ces efforts de compression axiale résiduelle causent les ondes de flambage.

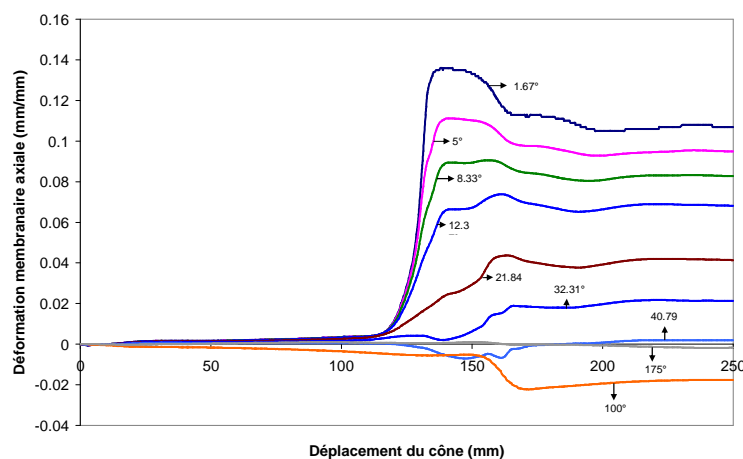


FIG. 13. Déformation membrane axiale à la section $y = 150\text{mm}$ durant le parcours du cône

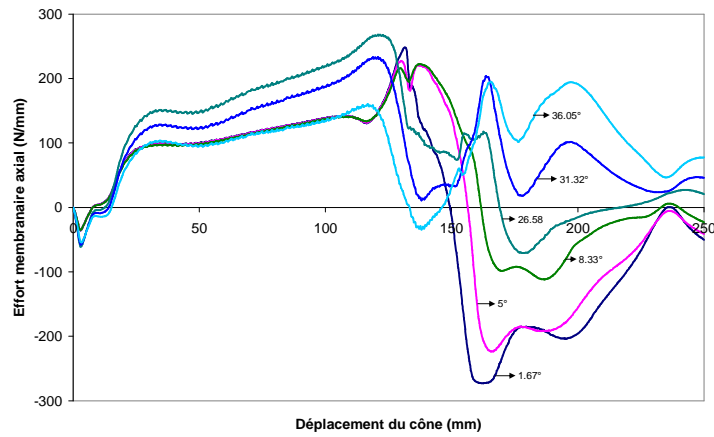


FIG 14. Flux de contrainte : membrane axiale (section $y = 150\text{mm}$) durant le parcours du cône

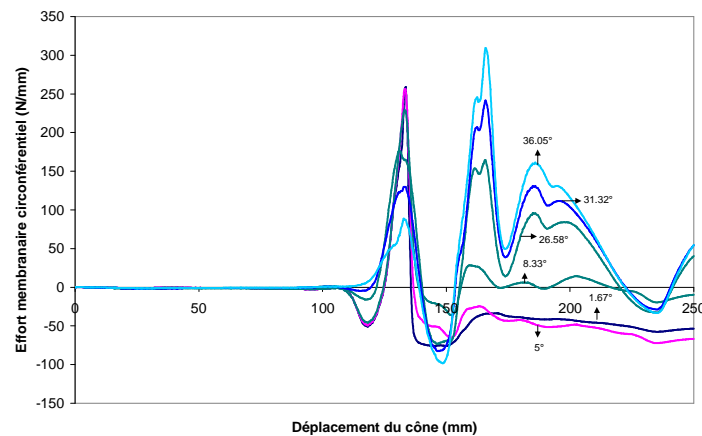


FIG 15. Flux de contrainte : membrane circonférentielle ($y = 150\text{mm}$) durant le parcours du cône

3.5. Conclusions

Les études expérimentales et numériques menées nous ont permis de comprendre l'origine des ondes de flambages qui apparaissent sur les bords libres générés par l'opération de « splitting » d'un tube. Les contraintes de compression axiale agissant sur une zone plastifiée provoquent l'apparition d'ondes sur les lèvres de la fissure. Ses contraintes peuvent être qualifiées de résiduelles en ce sens qu'elles caractérisent une bande au voisinage des lèvres de la fissure, à l'aval immédiat du front de fissure, et après passage de l'outil de découpe. La modélisation adoptée permet de capturer l'essentiel des observations physiques, nous constatons cependant que la qualité des résultats dépend de la nature des éléments choisis. Les éléments de coque volumiques sont moins rigides que les éléments massifs et permettent de mieux capturer la flexion, ce qui permet de mieux corroborer les ondes de flambage. La modélisation a permis de valider l'élément cohésif utilisé. Les prochaines étapes visent à considérer l'influence des paramètres cohésifs, du coefficient de frottement, de la densité de maillage notamment dans le cas des éléments volumiques, ainsi que l'effet de la dimension de l'outil de découpe (du cône), sur le comportement de la structure.

Références

- [1] Z. Zou, S.R. Reid. *Wavy-edged fractures in axially split aluminium tubes*, International Journal of Solids and Structures, Elsevier, Pages 4519-4540, 2005.
- [2] Ingo Scheider. *Cohesive model for crack propagation analyses of structures with elastic-plastic behaviour : Foundations and implantation*. GKSS research center Geesthacht, Dept. WMS, 2001.