

Pré-dimensionnement d'un dispositif d'expansion d'anneau pour l'étude de l'endommagement dynamique ductile des métaux

M. Sicard^{1,2}, P. Longère¹, G. Seisson², M. Xavier³

¹ Institut Clément Ader, Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA, IMT Mines Albi, CNRS, Toulouse, France

² CEA, DAM, CEA Gramat, F-46500 Gramat, France

³ CEA, DAM, CEA-DIF, Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon, France
martin.sicard@isae.fr, gabriel.seisson@cea.fr, mathieu.xavier@cea.fr, patrice.longere@isae.fr

Résumé — Cette étude présente le développement d'un dispositif d'expansion d'anneau pré-entaillés pour l'étude de l'endommagement dynamique ductile des métaux. L'objectif est de calibrer un modèle numérique capable de reproduire la rupture ductile dynamique à très haute vitesse de déformation jusqu'à $10^6 s^{-1}$. Le travail présenté porte sur le pré-dimensionnement numérique du dispositif, dont les résultats ont ensuite été comparés à des données expérimentales obtenues *a posteriori* afin de valider les simulations.

Mots clés — Endommagement ductile, expérimentation, dynamique rapide, modélisation constitutive non linéaire

1 Introduction

L'expansion rapide d'une enveloppe métallique peut se décomposer en plusieurs phases. La première phase est l'expansion homogène, l'enveloppe gonfle de manière élastique puis élasto-plastique jusqu'à la phase d'endommagement et la rupture finale. Lors de la phase élasto-plastique, des localisations de la déformation apparaissent, correspondant à des amincissements locaux de la matière, ce qui mène progressivement à une rupture de l'enveloppe métallique et à la génération de fragments. Pour des pressions internes suffisamment élevées, les fragments sont projetés à une vitesse de l'ordre du $km.s^{-1}$. L'énergie cinétique des fragments est la principale source de dégâts induits par la rupture dynamique d'une enveloppe métallique en expansion.

Le projet dans lequel s'inscrit cette étude vise à développer un modèle numérique capable de rendre compte des effets de l'endommagement ductile à très haute vitesse de déformation locale ($10^6 s^{-1}$) pour réaliser des simulations numériques réalistes impliquant une rupture ductile dynamique (écaillage, fragmentation, etc.). Des études analytiques [1] et expérimentales [2, 3] ont montré l'influence du taux de triaxialité des contraintes sur l'endommagement et la rupture des matériaux. Actuellement, les modèles d'endommagement utilisés, tels que [4, 5], ne couvrent pas tout le spectre de vitesses de déformation et de taux de triaxialité des contraintes représentatifs d'une enveloppe en expansion dynamique. L'enjeu est donc d'étendre le domaine de validité de ces modèles sur un plus large spectre.

Afin d'alimenter un modèle d'endommagement ductile à grande vitesse ($10^6 s^{-1}$), un dispositif expérimental de traction dynamique indirecte a été mis en place. Ce dispositif, fiable et répétable, basé sur l'expansion radiale dynamique d'anneau, permet d'acquérir des mesures de champ hautement résolues en espace ($\sim 10\mu m$) et en temps ($\sim 1\mu s$). Ces essais sont complétés par des essais dynamiques ($10^3 s^{-1}$) sur un dispositif de barres d'Hopkinson en traction et des essais de traction ($1s^{-1}$) sur une machine de traction conventionnelle. Les données expérimentales collectées sur les trois dispositifs expérimentaux permettront de calibrer ou d'adapter un modèle numérique d'endommagement ductile dynamique.

Le taux de triaxialité des contraintes T_{Σ} et la vitesse de déformation plastique équivalente $\dot{\kappa}$ ($\dot{\kappa} = \sqrt{\frac{2}{3} \underline{\underline{D}}^p : \underline{\underline{D}}^p}$, avec $\underline{\underline{D}}^p$ le taux de déformation plastique) ont un impact fort sur l'évolution de l'endommagement ductile. Pour cette raison, on cherche à adapter le dispositif d'expansion d'anneau existant pour étudier l'endommagement dynamique ductile des métaux. Le taux de triaxialité des contraintes T_{Σ} est défini comme le rapport entre la contrainte moyenne σ_m et la contrainte équivalente σ_{eq} :

$$T_{\Sigma} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} ; \sigma_m = \frac{Tr(\underline{\underline{\sigma}})}{3} ; \sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{s}} : \underline{\underline{s}}} ; \underline{\underline{s}} = \underline{\underline{\sigma}} - \sigma_m \underline{\underline{I}} \quad (1)$$

avec $\underline{\underline{\sigma}}$ le tenseur des contraintes de Cauchy, $\underline{\underline{s}}$ le déviateur des contraintes. Les taux de triaxialité impliqués lors de l'expansion d'une enveloppe métallique à fond hémisphérique se situent typiquement entre 0.3 et 0.7. On rappelle qu'un taux de triaxialité de 1/3 correspond à un essai de traction uniaxiale. En général, des essais de traction sur des échantillons présentant différentes géométries d'entailles sont réalisés pour explorer les plages de taux de triaxialité des contraintes souhaitées. Bridgman [6] a été le premier à proposer une solution analytique pour le calculer sur une éprouvette cylindrique entaillée.

La section 2 montre le dispositif d'expansion d'anneau existant et la section 3 présente l'adaptation du dispositif à l'utilisation d'anneau pré-entaillés.

2 Expansion dynamique d'anneaux

Un test d'expansion d'anneau est une expérience à échelle réduite utilisée pour étudier la fragmentation naturelle. L'expansion peut être obtenue par un chargement explosif [7], électromagnétique [8] ou mécanique [9, 10]. Il peut être assimilé à un essai de traction uniaxiale (en contrainte) indirecte avec des vitesses de déformation globales accessibles de l'ordre de $10^4 s^{-1}$.

En Fig.1 est présenté un schéma du dispositif d'expansion d'anneau PIDRET (*Plate Impact Driven Ring Expansion Tests*), développé par Gant *et al.* [9]. Il utilise un lanceur à gaz pour propulser un projectile à $150 m.s^{-1}$. Ce dernier, composé du sabot (1.1) et de l'impacteur (1.2), impacte le disque expandeur en polyéthylène haute densité (PEHD) (2) qui, sous l'effet de la pression, s'écoule radialement entre la bague (5) et l'enclume (4). Les bagues (5) et (6) servent à confiner le disque expandeur. Ce flux exerce une pression sur la surface intérieure de l'anneau de section carrée $1 \times 1 mm^2$ et de rayon moyen $20 mm$ (3), provoquant son expansion. Ce dispositif génère une multi-fragmentation de l'anneau à des vitesses de déformation globales allant jusqu'à $10^4 s^{-1}$. Le dispositif est équipé de sondes VH (vélocimétrie hétérodyne) pour mesurer la vitesse d'expansion radiale de l'anneau v_r par effet Doppler laser, et de deux caméras ultra-rapides pour suivre et enregistrer l'expansion, la multi-striction et la multi-fragmentation de l'anneau. Les diagnostics sont à haute résolution spatiale ($\sim 10 \mu m$) et temporelle ($\sim 1 \mu s$).

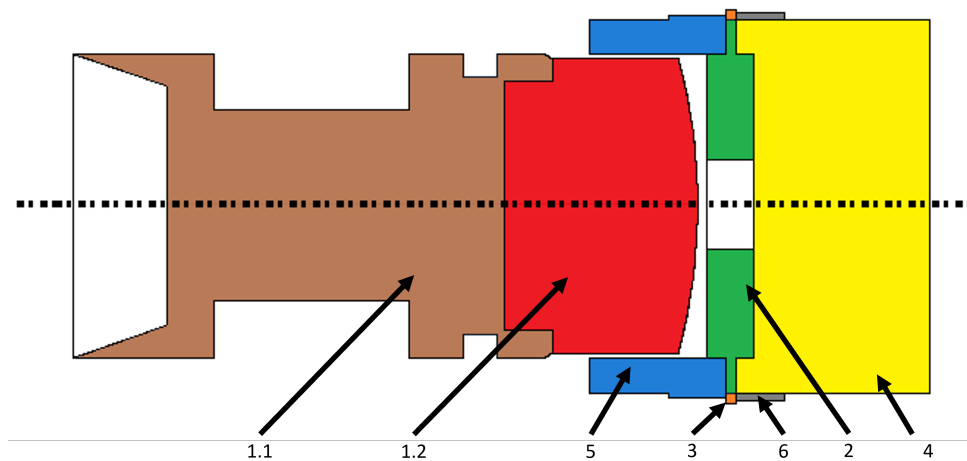


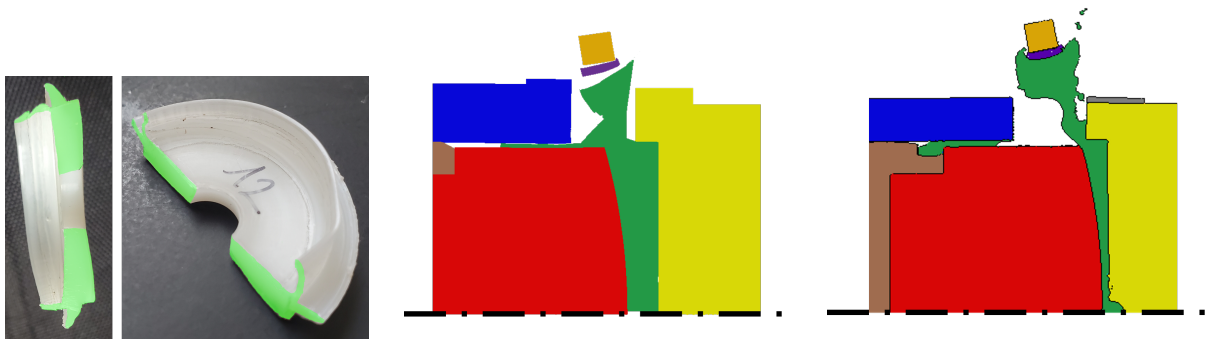
FIGURE 1 – Vue en coupe du dispositif d'expansion d'anneau, PIDRET, extrait de Gant *et al.* [9]. Description : (1.1) sabot, (1.2) impacteur, (2) disque expandeur, (3) anneau métallique, (4) enclume, (5) bague et (6) bague.

On propose d'utiliser des anneaux entaillés sur le dispositif d'expansion d'anneau afin de réaliser un essai de traction indirecte à grande vitesse de déformation sur une éprouvette entaillée (l'anneau). Pour ce faire, le dispositif d'expansion d'anneau développé par Gant *et al.* [9] doit être adapté. En effet, il est nécessaire d'augmenter la taille des anneaux, en passant d'une section carrée de $1 \times 1 mm^2$ à une section de $3 \times 3 mm^2$, pour répondre à des contraintes d'usinage et d'observabilité des entailles.

3 Modélisation numérique du dispositif d'expansion d'anneau (PIDRET)

On cherche à modifier le dispositif existant pour l'utilisation d'anneaux épais tout en gardant une vitesse d'expansion radiale v_r de l'anneau d'environ 200 m.s^{-1} et donc la même vitesse de déformation globale $\dot{\epsilon}$ de 10^4 s^{-1} . La masse de l'anneau étant environ 9 fois plus importante, pour garder la même vitesse d'expansion, il est nécessaire d'augmenter la vitesse d'impact du projectile v_p pour maintenir la vitesse d'expansion. Le but est de reproduire numériquement la mise en vitesse de l'anneau sur le dispositif dans la configuration actuelle, puis de modifier les dimensions de l'anneau et évaluer la vitesse incidente idéale du projectile v_p , et enfin vérifier expérimentalement les résultats.

Deux approches numériques sont proposées pour reproduire la mise en vitesse de l'anneau : (i) une approche eulérienne développée par [9, 11] au moyen du code dynamique rapide développé par le CEA DAM, Ouranos, et (ii) une approche lagrangienne au moyen du code de calcul commercial Abaqus. La géométrie utilisée dans les modèles est présentée en Fig. 1, avec dans les deux cas, un modèle 2D axisymétrique. La difficulté du modèle réside dans la reproduction du comportement du disque expanseur (2) en PEHD. En effet, c'est le disque expanseur qui fait l'interface entre le projectile et l'anneau et subit de grandes déformations très rapidement. Par manque de données expérimentales, le modèle de comportement du PEHD est une loi élastique parfaitement plastique qui ne prend pas en compte le caractère viscoplastique et l'endommagement du matériau. Pour les calculs Abaqus, les contacts sont des contacts rigides sans frottement. L'anneau est en acier 35NiCrMo16 (en orange), dont les lois de comportements suivent une loi de type Voce-Norton pour Abaqus et Zerilli Armstrong modifié pour Ouranos. Les coefficients ont été identifiés sur la même base de donnée expérimentale couvrant plusieurs vitesses de déformation, voir [9, 12]. La Fig. 2 montre le disque expanseur après un essai, une simulation lagrangienne et une simulation eulérienne. La simulation sur Abaqus montre une distorsion excessive des éléments et un genre de cône au niveau de l'anneau qui n'est pas présent expérimentalement. Sur les simulations Ouranos, le disque expanseur se comporte un peu comme un fluide, ce qui est assez éloigné du comportement attendu. De plus, on peut voir le disque expanseur pénétrer dans l'enclume à proximité de l'axe de révolution.



(a) Disque expanseur coupé après un essai. La surface verte est la section de coupe.

(b) Approche lagrangienne avec Abaqus.

(c) Approche eulérienne avec Ouranos.

FIGURE 2 – Comparaison de la forme du disque expanseur (en vert) avec les deux méthodes par rapport à un essai expérimental.

Lors de l'expansion d'un anneau de section $1 \times 1 \text{ mm}^2$, on distingue quatre phases, voir Fig. 3 :

- Une phase d'expansion homogène élastique à faible vitesse jusqu'à $t = 7 \mu\text{s}$.
- Une phase d'expansion elasto-plastique jusqu'à $t = 20 \mu\text{s}$ plus rapide.
- Une phase de décélération jusqu'à $t = 40 \mu\text{s}$ avec l'apparition de strictions sur l'anneau.
- Une phase de fragmentation de l'anneau non représentée sur les courbes qui arrive vers $t = 40 \mu\text{s}$.

Après la fragmentation, les fragments sont en vol libre et évoluent à vitesse constante ($\sim 150 \text{ m.s}^{-1}$). Les mêmes phénomènes sont observables dans le cas des anneaux épais à des temps différents. Les simula-

tions numériques n'intègrent pas de fragmentation de l'anneau et s'arrête avant le temps de fragmentation expérimental.

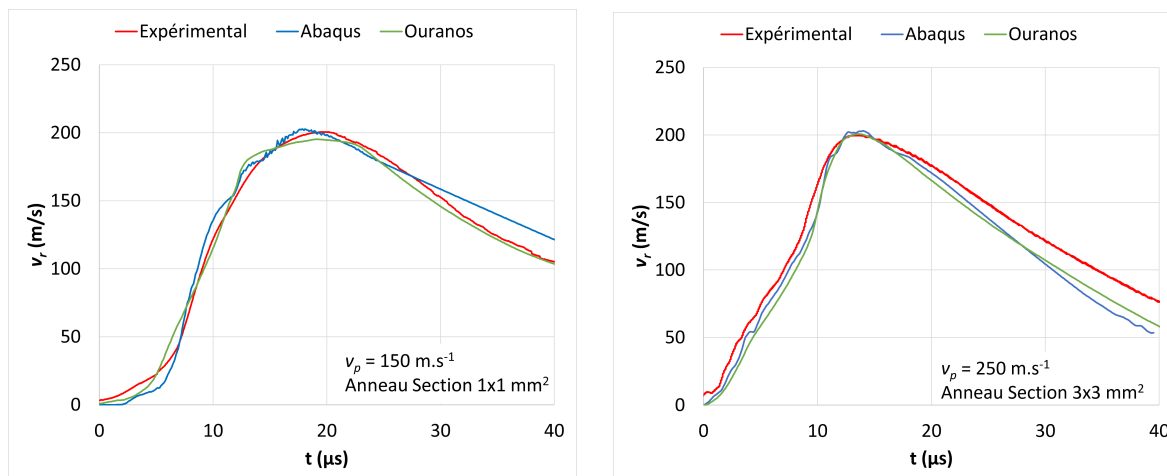


FIGURE 3 – Vitesse d'expansion radiale v_r d'un anneau en 35NiCrMo16 pour un essai, le modèle lagrangien (Abaqus) et le modèle eulérien (Ouranos) pour un anneau de section $1 \times 1 \text{ mm}^2$ à gauche et de section $3 \times 3 \text{ mm}^2$ à droite.

Les résultats des simulations numériques et des essais expérimentaux sont présentés en Fig. 3. Dans le cas des anneaux de section $1 \times 1 \text{ mm}^2$, les simulations Abaqus et Ouranos reproduisent bien la vitesse d'expansion de l'anneau. Le signal de vitesse avec Abaqus comporte du bruit qui n'est pas présent avec Ouranos. Concernant le cas des anneaux de section $3 \times 3 \text{ mm}^2$, les deux modèles numériques reproduisent bien le comportement expérimental de l'anneau.

Aucune des deux approches numériques n'est parfaite. En effet, le disque expanseur en PEHD dans l'état déformé numérique ne correspond pas aux observations expérimentales, voir Fig.2. Cependant, les deux modèles reproduisent correctement la vitesse d'expansion radiale. Ces premières estimations numériques ont permis de définir approximativement la vitesse d'impact du projectile v_p . Celle-ci a été confirmée lors d'une campagne expérimentale, la vitesse v_p nécessaire pour atteindre une vitesse de déformation de 10^4 s^{-1} avec un anneau de section $3 \times 3 \text{ mm}^2$ est de 250 m.s^{-1} .

4 Conclusion

En conclusion, cette étude a permis de développer et d'adapter un dispositif expérimental d'expansion d'anneau pour étudier l'endommagement ductile dynamique des métaux à très haute vitesse de déformation (10^6 s^{-1}). Les modèles numériques, bien que perfectibles, ont permis de reproduire avec une bonne précision la vitesse d'expansion radiale des anneaux, validant ainsi les modifications nécessaires pour l'utilisation d'anneaux épais.

En parallèle de ces simulations numériques, une étude paramétrique numérique a été réalisée pour sélectionner un panel de géométries permettant de couvrir la gamme de taux de triaxialité des contraintes représentative d'une enveloppe métallique en expansion.

Ces travaux de pré-dimensionnement ont ouvert la voie à la réalisation d'une campagne expérimentale sur le dispositif d'expansion d'anneau pré-entailés ainsi que des campagnes de traction directe sur les dispositifs de traction quasi-statique et dynamique des barres d'Hopkinson non présentées ici.

5 Remerciements

Ces travaux sont soutenus par le LRC FRAGDYN, un laboratoire de recherche conventionné rassemblant le CEA DAM, l'ISAE-SUPERO, l'Université de Lorraine, l'École des Mines de Saint-Etienne et le CNRS.

Références

- [1] J. Rice, D. Tracey, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 17.3, (1969) 201-217.
- [2] Y. Bao, T. Wierzbicki, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, *International Journal of Mechanical Sciences* 46.1, (2004) 81-98.
- [3] A. G. Geffroy, Modélisation numérique de la rupture de structures navales sous l'effet d'explosions au contact. Thèse, Université de Bretagne Sud, 2010.
- [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* 99.1, (1977) 2-15.
- [5] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica* 32.1, (1984) 157-169.
- [6] P. W. Bridgman *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, McGraw-Hill, New York, 1952.
- [7] D. M. Goto, R. Becker, T. J. Orzechowski, H. K. Springer, A. J. Sunwoo, C. K. Syn, Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders, *International Journal of Impact Engineering* 35, (2008) 1547-1556.
- [8] H. Zhang, K. Ravi-Chandar, On the dynamics of necking and fragmentation – I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O. *International Journal of Fracture* 142, (2006) 183-217.
- [9] F. Gant, G. Seisson, P. Longère, S. El Mai, J. L. Zinszner, High strain rate responses of some metals and alloys using a plate impact driven ring expansion test (PIDRET), *International Journal of Impact Engineering* 184, (2024) 104829.
- [10] J. Zhang, Y. Zheng, F. Zhou, J. Liu, Experimental technique for dynamic fragmentation of liquid-driving expanding ring, *EPJ Web of Conferences* 183-02034, (2018).
- [11] G. Seisson, F. Gant, P. Longère, S. El Mai, J. L. Zinszner, Using plate-impact-driven ring expansion tests (PIDRET) to assess analytical models, *Proceedings of the 17th Hypervelocity Impact Symposium*, (2024).
- [12] J. Petit, J. L. Dequiedt, Constitutive relations for copper under shock wave loading : Twinning activation, *Mechanics of Materials*, (2006).