



HAL
open science

Etude numérique de la striction multiple d'un barreau en traction uni-axiale sous chargement dynamique

Skander El Mai, Sébastien Mercier, Jacques Petit, Alain Molinari

► To cite this version:

Skander El Mai, Sébastien Mercier, Jacques Petit, Alain Molinari. Etude numérique de la striction multiple d'un barreau en traction uni-axiale sous chargement dynamique. 11e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2013, Giens, France. hal-01717830

HAL Id: hal-01717830

<https://hal.science/hal-01717830>

Submitted on 26 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

Etude numérique de la striction multiple d'un barreau en traction uniaxiale sous chargement dynamique

Skander EL MAI¹, Sébastien MERCIER², Jacques PETIT³, Alain MOLINARI⁴

¹ CEA, DAM, GRAMAT, F-46500, Gramat, France, skander.elmai@cea.fr

² LEM3, UMR CNRS 7239, Université de Lorraine, Ile du Saulcy, 57045 Metz, sebastien.mercier@univ-lorraine.fr

³ CEA, DAM, GRAMAT, F-46500, Gramat, France, jacques.petit@cea.fr

⁴ LEM3, UMR CNRS 7239, Université de Lorraine, Ile du Saulcy, 57045 Metz, alain.molinari@univ-lorraine.fr

Résumé — La fragmentation dynamique de structures est un sujet qui intéresse autant l'industrie (évaluation des risques liés à l'explosion de containers sous pression, . . .) que la défense (connaissance de la fragmentation des corps de bombes, . . .). De nombreuses études expérimentales ont été publiées concernant l'expansion dynamique de structures (cylindre, anneau, sphère ou hémisphère) au moyen de chargements par explosif ou par voie électromagnétique. Ces études permettent d'accéder à une description précise du processus de fragmentation dynamique. On pourra noter ici, parmi les références les plus récentes, [3] et [7] pour les chargements par explosif et [13] pour les chargements électromagnétiques. Afin de comprendre et reproduire les résultats expérimentaux, de nombreux auteurs ([1], [15], [11], [14], [8], [10] et [6] pour les plus récents) ont adopté la méthode des éléments finis pour simuler l'expansion d'une structure dans laquelle une perturbation initiale calibrée est introduite pour déclencher les instabilités et observer le phénomène de striction multiple conduisant à la fragmentation. L'amplitude de la perturbation est ajustée pour retrouver les résultats expérimentaux en termes de nombre et de distribution de fragments. Mais aucune étude ne semble encore être prédictive.

Dans ce travail, nous nous sommes attachés à étudier l'influence de l'amplitude de ces perturbations initiales et de la vitesse de chargement sur le temps d'apparition et la fréquence spatiale des instabilités, phénomène précurseur de la fragmentation, afin de pouvoir, à terme, réaliser des simulations prédictives. Ces perturbations qui, dans notre étude, portent sur la limite d'élasticité du matériau, sont réparties dans le barreau de façon aléatoire. Ce barreau est ensuite sollicité par un chargement en vitesse constante imposée. L'utilisation d'un critère en taux de déformation plastique permet de déterminer un temps de début des instabilités localisées. Différentes méthodologies peuvent être utilisées pour déterminer le nombre de strictions. Trois d'entre elles permettent d'obtenir des résultats intéressants : une méthode en critère seuil sur la vitesse de déformation plastique, une méthode par transformées de Fourier glissantes, et une méthode consistant à approximer par une loi de Weibull la transformée de Fourier des déformations plastiques le long de la barre. Cette dernière aboutit à des résultats réguliers décrivant de manière détaillée l'évolution du nombre de strictions en fonction de la vitesse de chargement et de l'amplitude des perturbations utilisées. Elle permet également de décrire des distributions de masses inter-strictions satisfaisantes.

Mots clés — Fragmentation, Instabilité, Striction, ALS, Traction, Simulation

1 Introduction

La fragmentation multiple a fait l'objet de nombreuses études expérimentales, en particulier depuis Mott [9], sur diverses structures sollicitée soit par chargements explosifs [3], [7] soit par voie électromagnétique [13]. Par ailleurs, de nombreuses simulations par éléments finis utilisant des perturbations ont été réalisées afin de rendre compte des résultats expérimentaux ([1], [15], [11], [14], [8], [10] et [6] pour les plus récentes). Tant expérimentalement que numériquement, la plupart de ces travaux s'intéresse à la description de la distribution des fragments. Les observations expérimentales des phénomènes de fragmentation multiple ont permis de distinguer trois phases : une première phase d'expansion stable ;

une seconde phase de développement d'instabilités, sous forme de strictions dans le cas de la traction uni-axiale ; et enfin une dernière phase durant laquelle certains de ces lieux d'instabilités (strictions dans notre étude) continuent de se développer conduisant à la rupture, tandis que d'autres verront leur développement s'arrêter.

La bonne compréhension de l'apparition de ces instabilités est donc primordiale pour la description ultérieure de la fragmentation multiple. En particulier, il est important de caractériser à la fois le nombre et le temps d'apparition de ces instabilités. L'expansion d'anneaux de cuivre est, dans cette étude numérique, modélisée au travers de la traction d'un barreau. Une méthode permettant de caractériser le temps d'apparition des strictions localisées sera présentée. Trois méthodes utilisées afin de déterminer le nombre de strictions seront ensuite comparées. L'objectif de cette étude est de décrire l'évolution de ces deux grandeurs en fonction de la vitesse de chargement, mais aussi en fonction de l'amplitude des perturbations introduites dans le modèle numérique afin de générer les instabilités.

2 Etude numérique

Dans cette étude, nous nous intéressons à la traction dynamique d'un barreau cylindrique en cuivre de rayon 0.5 mm et de longueur $l_0 = 128.805 \text{ mm}$. A noter que cette configuration est représentative de l'expansion d'anneaux de rayon intérieur 20 mm et de section carrée de $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Cette expérience est simulée à l'aide du code Ouranos développé par le *Commissariat à l'énergie atomique* (CEA) en configuration lagrangienne. Le barreau est sollicité à ses extrémités par un chargement en vitesse variant de 150 m/s à 2100 m/s . Il est constitué d'un maillage régulier de 1200 éléments suivant l'axe de symétrie, et 5 éléments suivant le rayon. Le comportement plastique du cuivre est décrit par une loi de Zerilli-Armstrong [12] (éq. 1) avec les coefficients définis dans le tableau 1.

$$\sigma_y = C_0 + C_2 \sqrt{\epsilon_p} \exp [(-C_3 + C_4 \ln \dot{\epsilon}_p) T] \quad (1)$$

	C_0 [MPa]	C_2 [MPa]	C_3 [K^{-1}]	C_4 [K^{-1}]
ZA-bcc	71.525	854.25	2.05723×10^{-3}	8.0677×10^{-5}

Tableau 1 – Paramètres de la loi de Zerilli-Armstrong pour le cuivre d'étude

Le phénomène de striction multiple est initié en introduisant, dans le maillage, une perturbation aléatoire appliquée à la limite élastique σ_y du matériau. Ainsi, à chaque élément du maillage est associée aléatoirement une limite élastique comprise entre $\sigma_y (1 - A)$ et $\sigma_y (1 + A)$ où A est l'amplitude de la perturbation maximale. Différentes amplitudes sont ici adoptées : 1 %, 5 %, 10 % et 20 %. Par ailleurs, des simulations sans perturbation initiale ont montré que le barreau pouvait subir des élongations importantes sans mise en évidence de phénomènes d'instabilités, ce qui exclut, dans cette étude, tout effet lié aux perturbations d'origine purement numérique. Un exemple d'évolution du rayon, de la déformation et de la vitesse de déformation plastique, suivant l'abscisse longitudinale x l_0/l , issu des résultats de simulations avec perturbations, est représenté sur la Figure 1 pour une vitesse de chargement de $v_0 = 150 \text{ m/s}$ et une amplitude de perturbation de $A = 1 \%$. La vitesse de déformation nominale vaut $\frac{v_0}{l_0} = 2330 \text{ s}^{-1}$ au début du calcul.

Ces simulations ont été réalisées sans prise en compte d'un modèle d'endommagement ou d'un critère de rupture. C'est pourquoi les déformations au sein des strictions localisées peuvent atteindre des valeurs importantes. Le maillage associé devient fortement déformé. Dans ces travaux, nous nous limiterons de toute manière à la phase de développement des instabilités jusqu'à l'apparition des strictions localisées que nous caractériserons en termes de temps d'apparition et de fréquence.

2.1 Temps d'apparition des strictions localisées

Lorsque les strictions se développent, un front de décharge élastique issu de ces strictions apparaît et se propage dans le barreau (voir Figure 2). Ce front est régulièrement associé à l'onde de Mott [9]. Le temps d'apparition des strictions localisées t_{neck} peut donc être estimé à partir de l'apparition de cette décharge élastique caractérisée par $\dot{\epsilon}_p = 0$.

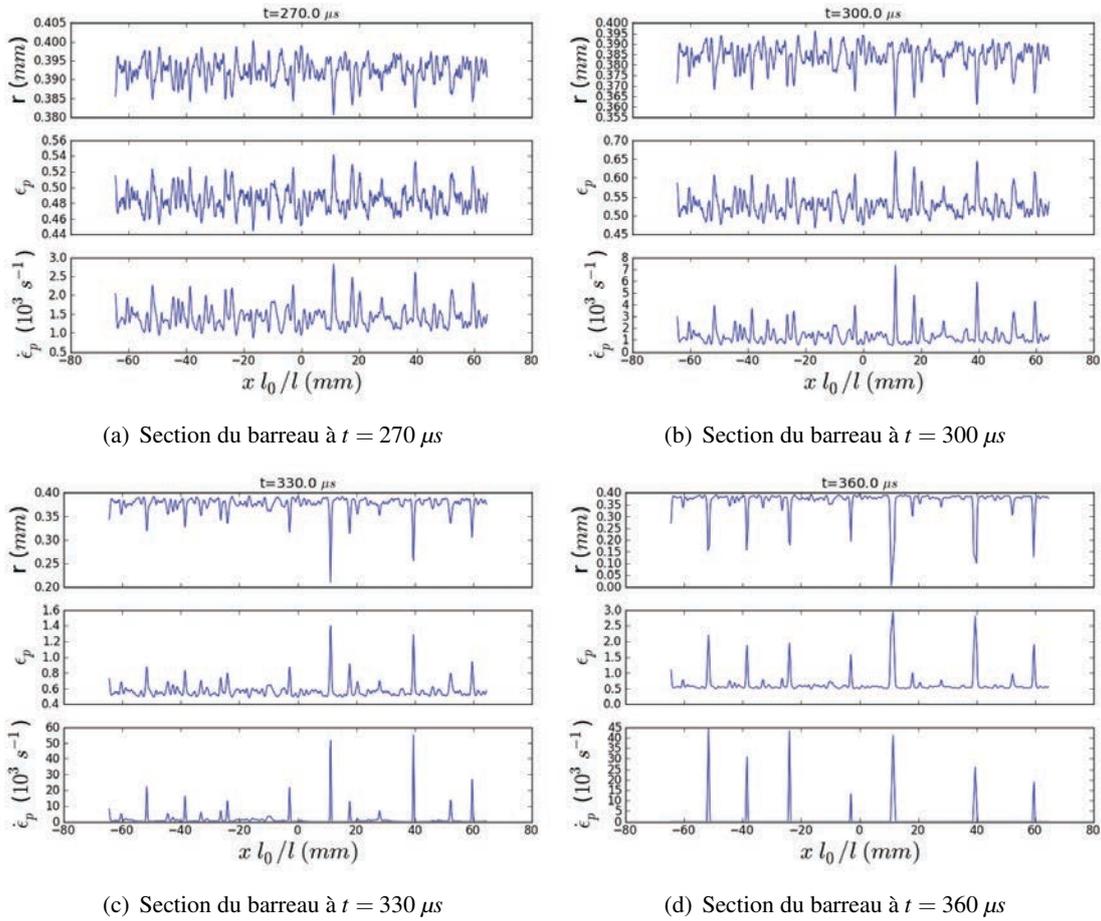


Fig. 1 – Evolution du rayon, de la déformation plastique et du taux de déformation plastique pour $v_0 = 150 \text{ m/s}$ et $A = 1 \%$ à $t = 270, 300, 330, 360 \mu s$

L'évaluation de ce temps caractéristique pour les différentes vitesses et les différentes amplitudes de perturbation montre une évolution en loi puissance par rapport à chacune de ces deux grandeurs. La loi d'évolution correspondante peut alors s'écrire sous la forme (voir Fig. 3) :

$$t_{neck} = K(\text{mat, géom}) v_0^a A^b \quad (2)$$

où $K(\text{mat, géom})$ est un coefficient dépendant uniquement du matériau et de la géométrie considérés.

La loi d'évolution estimée montre que la vitesse de chargement a une influence plus importante que l'amplitude des perturbations utilisées. Pour autant, l'influence de cette amplitude n'est pas négligeable. On pourra enfin noter que Zhang et Ravi-Chandar [13] ont observé des tendances similaires concernant le temps d'apparition des strictions dans les anneaux qu'ils ont testés à différentes vitesses.

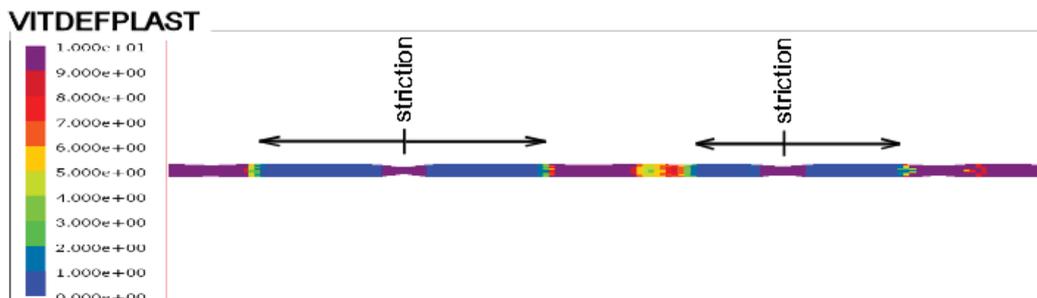


Fig. 2 – Taux de déformation plastique : mise en évidence (en bleu) des fronts de décharge élastique issus de strictions

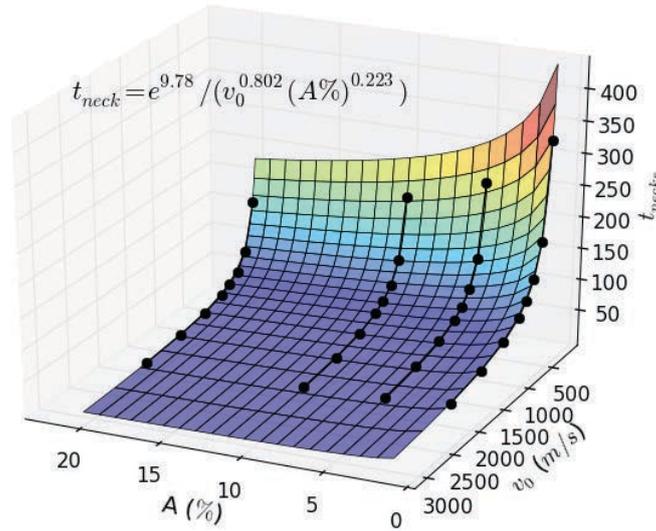


Fig. 3 – Evolution du temps d'apparition des strictions localisées en fonction de la vitesse de chargement et de l'amplitude des perturbations

2.2 Nombre de strictions

Distinguer les défauts issus des perturbations initiales, des strictions nées des phénomènes d'instabilité, est difficile à réaliser. En général, une valeur seuil est considérée comme dans l'article [2]. Trois méthodologies ont été évaluées et comparées afin de compter le nombre de strictions N_{neck} au temps t_{neck} : une méthode en critère seuil sur la vitesse de déformation plastique, une méthode consistant à approcher par une loi de Weibull la transformée de Fourier des déformations plastiques le long du barreau, et une méthode par transformée de Fourier glissante. Le nombre de strictions obtenu avec chacune de ces méthodes est représenté sur la Figure 4 en fonction de la vitesse de chargement, en échelle logarithmique.

Seuil en vitesse de déformation plastique : Une striction est dénombrée dès que la vitesse de déformation plastique est au-dessus d'une grandeur seuil (ici $\dot{\epsilon}_{moy}$). D'après les résultats de la Figure 1, la vitesse de déformation est la grandeur la plus discriminante pour déterminer le nombre de strictions. Par ailleurs, une petite variation du seuil choisi ne change pas ou peu le nombre de strictions obtenues. Cependant, d'après les résultats représentés sur la Figure 4, cette méthodologie semble diverger lorsque l'amplitude des perturbations ($A\%$) devient grande, en particulier aux faibles vitesses de chargement.

Approximation par la loi de Weibull des transformées de Fourier des déformations plastiques dans le barreau : Au temps t_{neck} , le profil de déformation plastique (par exemple sur la Figure 1) peut être étudié par transformée de Fourier. La transformée de Fourier de ce signal a une forme caractéristique d'une loi de type Weibull (voir Fig. 5) :

$$f_{Weibull}(x, m, \sigma) = C \frac{m}{\sigma} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^{(m-1)} e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^m} \quad (3)$$

où C est un facteur constant, m et σ sont respectivement le paramètre de forme et le paramètre d'échelle de la distribution de Weibull.

Le mode correspondant au maximum de la distribution de Weibull déterminée fournit alors le mode dominant de striction. Les résultats du nombre de strictions obtenus par cette méthode décrivent une évolution logarithmique fonction de v_0 , quelle que soit l'amplitude des perturbations initiales utilisées (voir Fig. 4). De la même manière que pour t_{neck} , il est possible d'établir la dépendance de N_{neck} vis-à-vis de la vitesse de chargement et de l'amplitude des perturbations sous la forme suivante :

$$N_{neck} = K'(\text{mat, géom}) v_0^a A^{b'} \quad (4)$$

où $K'(\text{mat, géom})$ est un coefficient dépendant uniquement du matériau et de la géométrie considérés. On remarque sur la Figure 6 que le nombre de strictions ne dépend pratiquement pas de l'amplitude des

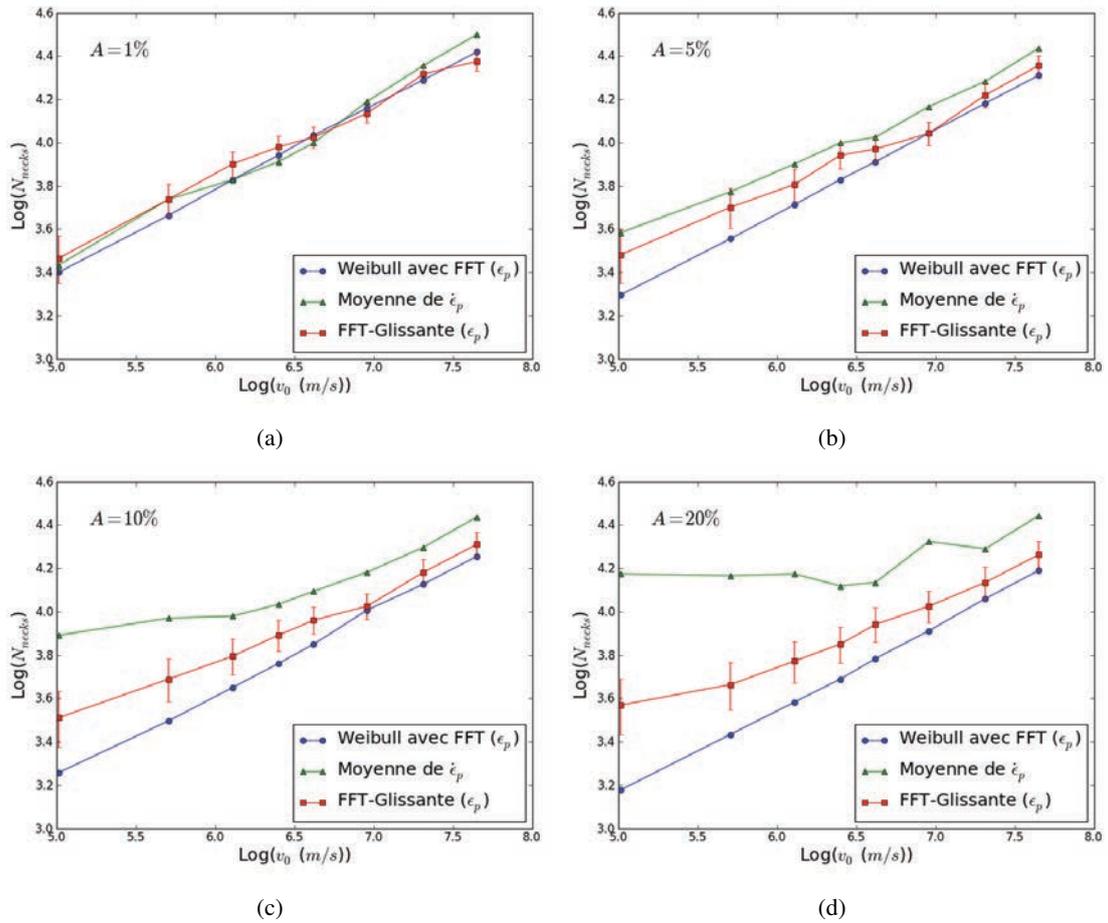


Fig. 4 – Comparisons du nombre de strictions obtenu grâce aux trois méthodes à t_{neck} donné : seuil en vitesse de déformation plastique (le seuil choisi ici est égale à la valeur moyenne), l’approximation par une loi de Weibull des transformées de Fourier des déformations plastiques, et la transformée de Fourier glissante des déformations plastiques - échelles logarithmiques

perturbations, en particulier lorsque $A > 5 \%$. Cette relation puissance entre le nombre de strictions et la vitesse de chargement a été mise en évidence par Guduru et Freund [5] et par Zhang et Ravi-Chandar [14]. Expérimentalement, Grady et Olsen [4] obtiennent également une relation similaire pour le nombre de fragments.

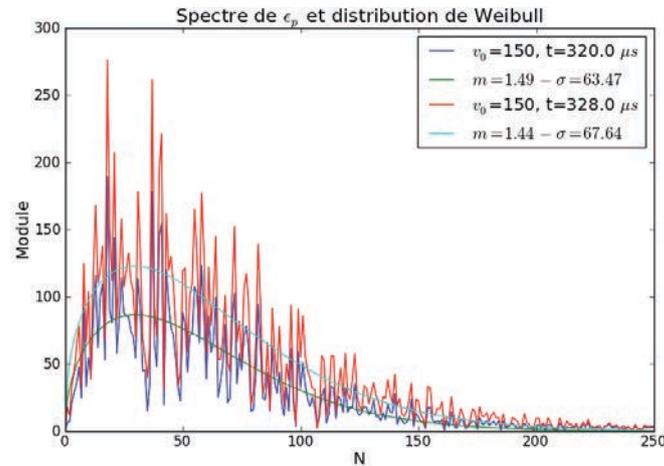


Fig. 5 – Transformée de Fourier de la déformation plastique et approximation par une distribution de Weibull ($v_0 = 150 \text{ m/s}$ et $A = 1 \%$) aux temps 320 et 328 μs

Utilisation de transformées de Fourier glissantes : Il est également possible d'étudier les profils de déformation plastique de la Figure 1 à l'aide de transformées de Fourier glissantes. Le principal intérêt de cette méthodologie est de pouvoir obtenir un ensemble de modes dominants à partir duquel une moyenne et un écart-type sont évalués. Cet écart-type permet alors d'estimer l'erreur sur le nombre de strictions obtenu. Les résultats obtenus par cette méthode (Figure 4) sont, dans l'ensemble, satisfaisants, mais dérivent légèrement, pour le seuil en vitesse de déformation plastique, pour de grandes amplitudes de perturbation et de faibles vitesses de chargement.

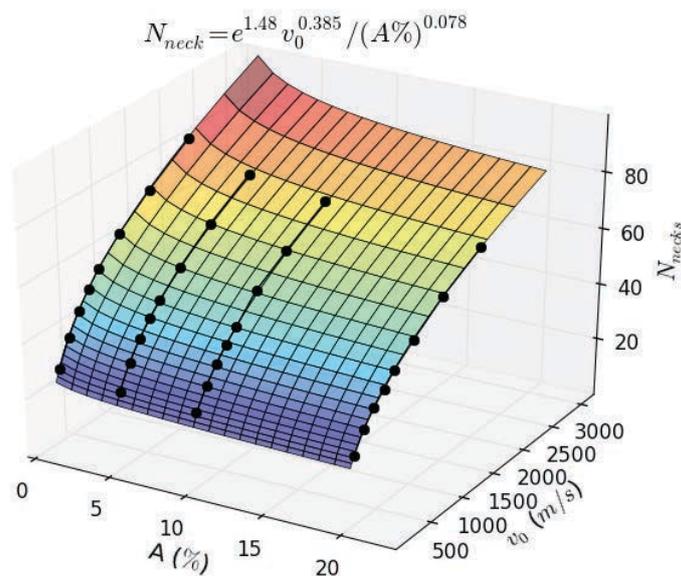


Fig. 6 – Evolution du nombre de strictions prises à t_{neck} en fonction de la vitesse de chargement et de l'amplitude des perturbations

3 Conclusions

Plusieurs simulations numériques lagrangiennes avec perturbations aléatoires ont été réalisées afin d'évaluer l'influence de la vitesse de chargement et de l'amplitude de perturbations sur la limite élastique σ_y introduites dans le maillage. Un temps caractéristique t_{neck} , associé à l'apparition de strictions localisées, a été mis en évidence. Différentes méthodologies ont ensuite été évaluées pour compter le nombre N_{neck} de strictions obtenues au temps t_{neck} . La méthodologie la mieux adaptée semble être celle basée sur l'approximation par une loi de Weibull des transformées de Fourier des déformations plastiques dans le barreau en traction. C'est la méthode choisie pour évaluer l'évolution du nombre de strictions N_{neck} . En complément, l'utilisation de transformées de Fourier glissantes apporte une information supplémentaire concernant la dispersion sur l'estimation du nombre de strictions. Un couplage de ces deux méthodologies est donc à envisager. La troisième méthode, basée sur un seuil en vitesse de déformation plastique, est la moins performante.

Les deux grandeurs t_{neck} et N_{neck} ainsi obtenues dépendent de la vitesse de chargement et de l'amplitude des perturbations utilisées suivant des lois déterminées. L'amplitude des perturbations a une influence bien plus importante sur t_{neck} que sur N_{neck} . En effet, le nombre de strictions N_{neck} ne dépend quasiment pas de cette amplitude. Cela peut expliquer les bons résultats en termes de distribution de strictions ou de fragments des différentes tentatives numériques de la littérature, en particulier lorsque l'amplitude A dépasse une valeur d'environ 5 % (voir [1], [15], [11], [14], [8], [10] et [6]). Si l'on souhaite restituer temporellement le processus d'instabilité dans les simulations, il faut calibrer précisément l'amplitude des perturbations permettant de retrouver un temps t_{neck} approprié. Dans le cadre de la simulation d'une structure en expansion par chargement explosif, par exemple, une mauvaise calibration entraînera des ruptures trop tôt ou trop tard par rapport à la réalité. Le travail de la poussée des produits de détonation et la vitesse résiduelle des fragments seront alors affectés par un confinement trop fort ou par des fuites de gaz prématurées.

A partir des distributions de Weibull obtenues pour le nombre de strictions, il est possible numériquement d'évaluer une distribution de masses inter-strictions. Par exemple, en considérant un tirage aléatoire correspondant à dix expériences numériques pour chaque vitesse de chargement $v_0 = 300, 600, 1050$ et 2100 m/s, et une amplitude de perturbation de $A = 1$ %, la masse des zones inter-strictions suivra une distribution telle que représentée sur la Figure 7. Ces résultats sont conformes aux résultats expérimentaux obtenus par Zhang et Ravi-Chandar [13].

Il faut noter toutefois que ces travaux numériques ont été réalisés à partir d'un unique maillage régulier en représentation axisymétrique. Une perturbation attribuée à une maille sur l'axe n'a donc pas le même poids qu'une perturbation attribuée à une maille périphérique. Des simulations utilisant un maillage adapté permettant de distribuer les perturbations sur des volumes identiques sont en cours. De plus, ces travaux seront approfondis en étudiant la convergence au maillage comme l'ont fait Bishop et Strack [2]. Toutes ces études serviront, à terme, à concevoir une méthodologie prédictive pour la simulation de la fragmentation multiple.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet d'étude amont, le PEA MATERIAUX, financé par la Direction Générale pour l'Armement (DGA).

Références

- [1] R. Becker. *Ring fragmentation predictions using the Gurson model with material stability conditions as failure criteria*, Int. J. Sol. and Struct., 39, 3555-3580, 2002.
- [2] J.E. Bishop, O.E. Strack. *A statistical method for verifying mesh convergence in Monte Carlo simulations with application to fragmentation*, Int. J. Numer. Meth. Engng., 88, 279-306, 2011.
- [3] 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*, Int. J. Impact. Eng., 35, 1547-1556, 2008.
- [4] D. E. Grady, M.L. Olsen. *A Statistics and Energy Based Theory of Dynamic Fragmentation*, Int. J. Impact. Eng., 29, 293-306, 2003.
- [5] P.R. Guduru, L.B. Freund. *The dynamics of multiple neck formation and fragmentation in high rate extension of ductile materials*, Int. J. Solids Struct., 39, 5615-5632, 2002.

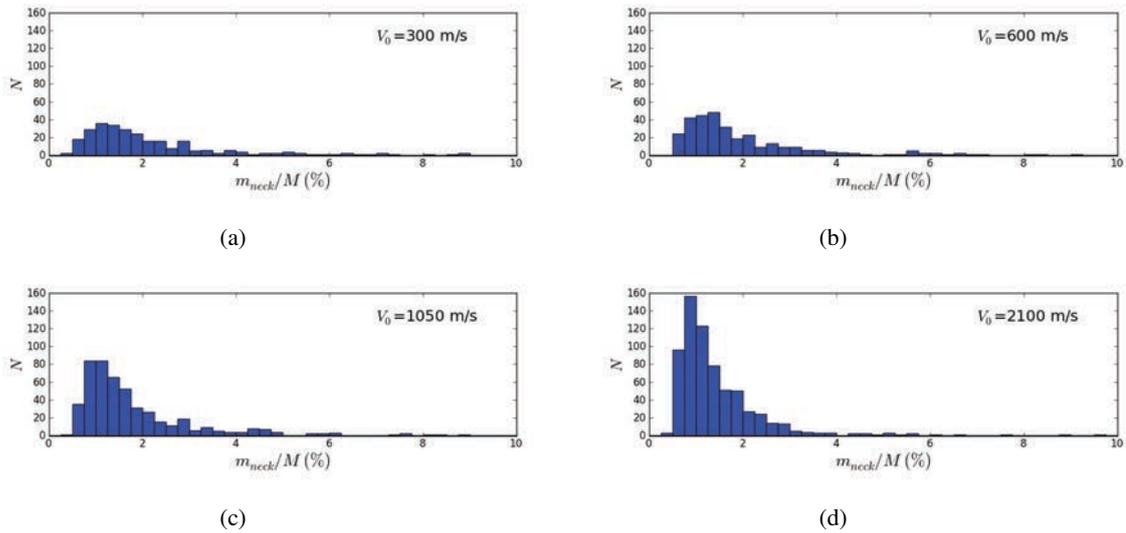


Fig. 7 – Distribution de masses inter-strictions pour dix expériences numériques à $v_0 = 300, 600, 1050$ et 2100 m/s , et une amplitude de perturbation de $A = 1 \%$ ($M =$ masse d'un anneau)

- [6] M.V. Hopson, C.M. Scott, R. Patel. *Computational comparisons of homogeneous and statistical descriptions of AerMet100 steel subjected to high strain rate loading*, Int. J. Impact. Eng., 38, 451-455, 2011.
- [7] S. Mercier, N. Granier, A. Molinari, F. Llorca, F. Buy. *Multiple necking during the dynamic expansion of hemispherical metallic shells, from experiments to modelling*, J. Mech. Phys. Sol., 58(7), 955-982, 2010.
- [8] J. Meulbroek, K. Ramesh, P. Swaminathan, A. Lennon. *CTH simulations of an expanding ring to study fragmentation*, Int. J. Impact Eng., 35(2), 1661-1665, 2008.
- [9] N.F. Mott. *Fragmentation of shell cases*, Proceedings of The Royal Society, Series A, 300-308, 1947.
- [10] J. Petit. *An approach to Generate Random Localizations in Lagrangian Numerical Simulations*, Chap. 14, Materials under Extreme Loadings, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 313-332, 2010.
- [11] A. Rusinek et R. Zaera. *Finite element simulation of steel ring fragmentation under radial expansion*, Int. J. Impact Eng., 34, 799-822, 2007.
- [12] F.J. Zerilli, R.W. Armstrong. *Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations*, J. Appl. Phys., 61, 1816-1825, 2006.
- [13] H. Zhang et K. Ravi-Chandar. *On the dynamics of necking and fragmentation - I. Real-time and post-mortem observations in Al 6061-O*, Int. J. Fract., 142, 183-217, 2006.
- [14] H. Zhang et K. Ravi-Chandar. *On the dynamics of necking and fragmentation-II. Effect of material properties, geometrical constraints and absolute size*, Int. J. Fract., 150, 3-36, 2008.
- [15] F. Zhou, J. F. Molinari, K.T. Ramesh. *An elastic-visco-plastic analysis of ductile expanding ring*, Int. J. Impact Eng., 33, 880-891, 2006.