

Etude des limites de formage dans le procédé de relevage de bord d'un trou

A. KACEM^{a,b}, A. KRICHEN^b et P.Y. MANACH^a

a. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, Lorient, F-56100, France

b. Université de Sfax, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, LGPMM, UR17ES43, 3038, Sfax, Tunisie

Résumé :

Dans ce travail, des simulations numériques et des expériences ont été réalisées pour étudier les limites de formage dans le procédé de relevage du bord d'un trou avec et sans laminage. Une caractérisation mécanique a été effectuée en utilisant des essais de traction. Des modèles éléments finis ont été développés en utilisant des critères de plasticité isotrope et anisotrope. Ces modèles ont été améliorés par la prise en compte de l'endommagement. Des expérimentations ont été réalisées pour valider les résultats numériques. Dans une première partie, un intérêt a été porté à l'analyse de l'effet du taux de réduction sur le procédé de relevage du bord d'un trou. Une méthodologie a été mise au point pour distinguer les deux conditions de relevage : avec ou sans laminage. L'étude s'est ensuite orientée vers l'identification de la capacité limite de déformation d'un bord relevé. Le critère d'initiation de rupture de Bao-Wierzbicki (BW) et le modèle d'endommagement couplé de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) ont été utilisés. Les résultats numériques ont été comparés avec les résultats expérimentaux afin de vérifier l'aptitude des deux modèles à décrire les limites de formage dans le procédé de relevage du bord d'un trou.

Abstract :

In the present work, FE simulations and experiments were performed to study the forming limits in the hole-flanging with and without rolling. Mechanical characterizations have been performed through uniaxial tensile tests. Elastic-plastic finite element models based on isotropic and anisotropic yield criteria were developed. These models were enhanced by the implementation of the damage in the simulation. Experiments were conducted to verify the reliability of the developed finite element models. First, the effect of the clearance thickness ratio on the hole-flanging process was studied. A methodology was made to distinguish both conditions of hole-flanging : with or without rolling. The study was then focused on the determination of the limits of hole-flanging process arising from material failure. The Bao-Wierzbicki (BW) fracture criterion and the Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) coupled damage model were used. Numerical results were compared with the experimental ones to verify the validity of both models in describing the failure during the hole-flanging process.

Mots clefs : mise en forme par déformation plastique ; procédé de relevage du bord d'un trou ; simulation numérique ; éléments finis ; alliages d'aluminium ; endommagement.

1 Introduction

Le relevage de bord d'un trou est un procédé de mise en forme par déformation plastique largement utilisé pour la production d'un bord relevé à partir d'un trou préalablement poinçonné dans une tôle mince. Suivant la valeur de jeu entre le poinçon et la matrice j le relevage peut être pratiqué avec ou sans laminage (Fig. 1).

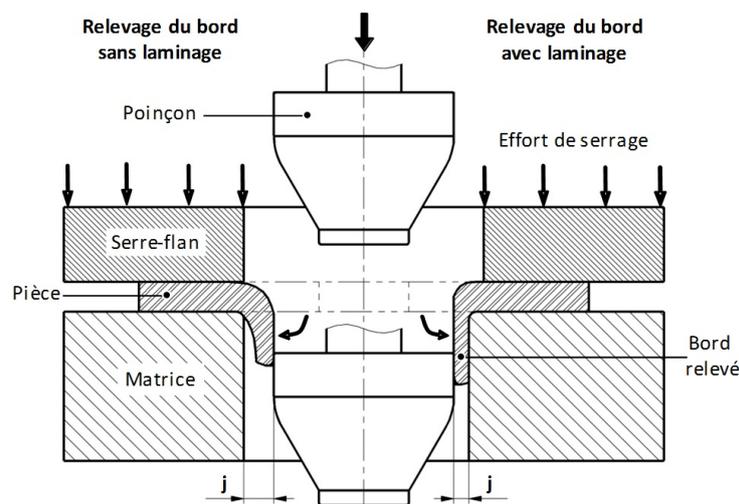


FIGURE 1 – Procédé de relevage de bord d'un trou avec laminage (à droite) et sans laminage (à gauche)

Pour les valeurs élevées de jeu, le relevage est réalisé sans laminage. Dans ce cas, la mise en forme du bord est principalement gouvernée par le phénomène d'expansion qui provoque un amincissement local du bord relevé. En revanche, pour les valeurs faibles de jeu, le relevage est réalisé avec laminage. Dans ce cas, en plus de l'expansion le poinçon oblige une partie du métal à pénétrer dans la cavité de la matrice par écrasement. Cette action produit un bord plus long mais avec une épaisseur plus faible.

Dans les deux conditions le procédé est limité par l'apparition de défauts ou la rupture du bord. Plusieurs modèles d'endommagement ont été utilisés pour prédire l'apparition de ces limites. A titre d'exemple, Thipprakmas et al. [1] ont utilisé le critère de Oh [2] pour analyser l'effet de la disposition de la tôle par rapport à la direction de relevage pour un avant-trou poinçonné. Takuda et al. [3, 4] ont utilisé le critère de Oyane [5] pour étudier les effets de la forme et des dimensions du poinçon sur la réussite ou l'échec du procédé de relevage. Thipprakmas et al. [6] ont utilisé le critère de Ayada [7] dans le cadre d'une étude de l'effet de la technique d'obtention de l'avant-trou sur le procédé de relevage. Pour évaluer l'effet du procédé d'obtention de l'avant-trou sur le procédé de relevage, Chung et al. [8] ont utilisé le critère de Bao-Wierzbicki (BW) [9] pour analyser l'influence des contraintes résiduelles dues à l'opération du poinçonnage qui précède le relevage sur les limites du procédé. En utilisant le modèle de Lemaitre [10], Badreddine et al. [11] ont initié une étude sur l'effet des contraintes résiduelles créées par le poinçonnage sur la distribution de l'endommagement après un relevage partiel du bord. Uthaisangsuk et al. [12] ont utilisé le relevage de bord pour valider le modèle Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) [13] dans le cas des aciers biphasés.

L'objectif de ce travail est la prédiction et l'identification des limites de formage dans le procédé de relevage du bord d'un trou avec et sans laminage. Dans une première partie, une méthodologie a été mise au point pour distinguer les deux conditions de relevage : avec ou sans laminage. Ensuite, le critère d'initiation de rupture de Bao-Wierzbicki (BW) et le modèle d'endommagement couplé de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) ont été utilisés pour prédire les limites de ce procédé. Les paramètres des deux modèles ont été identifiés par méthode inverse à partir des résultats de l'essai de traction réalisé jusqu'à la rupture. Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées pour analyser les différents types de défauts tels que l'aspect de peau d'orange, les strictions, les déchirures, les microfissures et les microcavités. Les résultats numériques ont été comparés avec les résultats expérimentaux pour vérifier l'aptitude des deux modèles à décrire les limites de formage dans le procédé de relevage du bord d'un trou.

2 Matériaux et techniques

2.1 Loi de comportement des matériaux

Deux nuances d'aluminium présentant des comportements mécaniques relativement différents ont été sélectionnées. Il s'agit de l'aluminium non allié A1050-H14 et de l'alliage d'aluminium-magnésium-silicium A6061-O. Ces deux matériaux ont été utilisés sous forme de tôle d'épaisseur $e = 2$ mm. Le comportement est supposé élasto-plastique avec un écrouissage isotrope régi par des critères de plasticité isotrope (Von Mises) et anisotrope (Hill48). L'endommagement des matériaux a été modélisé en utilisant le critère d'initiation de rupture de Bao-Wierzbicki (BW) et le modèle d'endommagement couplé de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN), dont la formulation est détaillée dans [14, 15].

Les paramètres des modèles d'écrouissage et d'endommagement ont été identifiés en se basant sur les résultats des essais de traction réalisés jusqu'à la rupture (figure 2). Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes rectangulaires de dimensions $150 \times 20 \times 2$ mm³. La vitesse de déplacement de la traverse est maintenue constante au cours de l'essai à 5 mm/min. Les valeurs des paramètres des modèles ont été obtenues en minimisant l'écart entre les valeurs de la courbe de traction issues de la caractérisation mécanique et les valeurs calculées à partir des modèles adoptés comme le montre la figure 2. Pour le modèle GTN, seuls les paramètres f_N , f_c et f_f ont été identifiés tandis que les autres paramètres ont été fixés aux valeurs préconisées dans [16]. Le tableau 1 présente les valeurs des paramètres des matériaux.

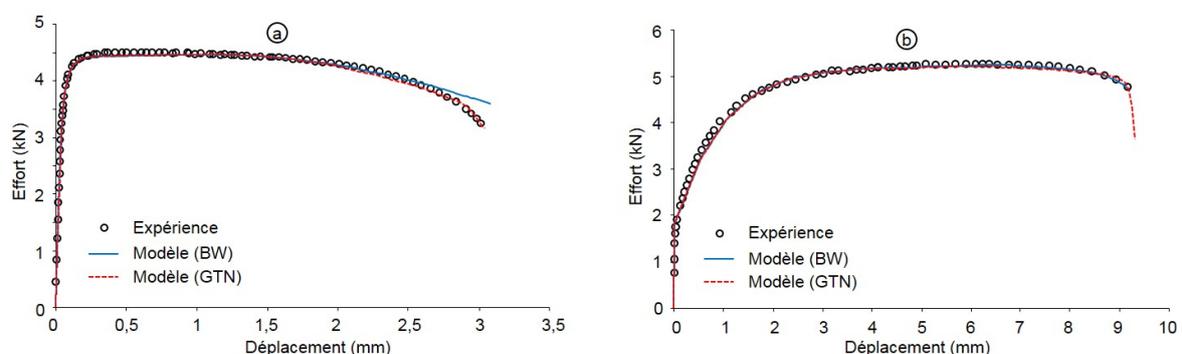


FIGURE 2 – Courbes effort-déplacement expérimentales et numériques (a) A1050-H14 (b) A6061-O

2.3 Modélisation numérique

Des modèles 2D axisymétrique et 3D ont été définis pour réaliser des simulations numériques sur le procédé de relevage de bord d'un trou en utilisant le logiciel ABAQUS dans ses deux versions standard et explicite. En tenant compte de la rigidité de l'outillage, les éléments en contact avec la tôle (poinçon, matrice et serre-flan) sont considérés comme des corps rigides. Pour le modèle 2D axisymétrique, des éléments rectangulaires à 4 noeuds et à intégration réduite et des éléments triangulaires à 3 noeuds de type CAX4R et CAX3, respectivement, ont été utilisés pour le maillage de la tôle. Pour limiter la distorsion excessive des éléments et améliorer la précision des résultats obtenus, la technique de remaillage a été utilisée. Concernant le modèle 3D, les simulations ont été réalisées avec des éléments volumiques à interpolation linéaire et à intégration réduite (C3D8R). Pour ce modèle la technique de remaillage n'a pas été utilisée mais les zones de la pièce fortement déformées ont été finement maillées. Quant aux zones de faible déformation, un maillage grossier a été appliqué. Le nombre total d'éléments est de l'ordre de 20000 pour les modèles 3D et de 4000 pour les modèles 2D. Le contact entre la tôle et les outils a été modélisé par la loi de frottement de Coulomb avec un coefficient constant de valeur comprise entre 0,17 et 0,2. Afin d'assurer un déroulement logique du procédé, le mode de chargement et les conditions aux limites sont proches du protocole expérimental du procédé de relevage de bord. Durant toute la simulation, la matrice et le serre-flan sont fixes. Le poinçon est soumis à un déplacement axial descendant assurant toute sa pénétration dans l'avant-trou. Pour les calculs avec la version explicite, le poinçon est piloté à une vitesse de déplacement fixe de l'ordre de 17 mm/s. Dans ce cas, pour réduire le temps de calcul, l'option "mass scaling" a été utilisée dans ABAQUS avec des valeurs ajustées de telle sorte que l'énergie cinétique reste au-dessous du seuil de 5 % de l'énergie interne évitant ainsi les effets d'inertie.

3 Résultats et discussions

3.1 Conditions de relevage de bord

Les conditions de relevage de bord varient en changeant le jeu j entre le poinçon et la matrice. Les valeurs de taux de réduction T_r correspondant au changement du jeu j sont comprises entre 0,41 et 1,52. La figure 4 montre les formes finales du bord relevé obtenues expérimentalement et numériquement pour l'alliage d'aluminium A1050-H14 et pour différentes valeurs de T_r .

Les résultats expérimentaux et numériques présentés sur la figure 4 illustrent l'importance du phénomène d'amincissement du bord relevé pour la totalité des valeurs considérées de T_r . Pour les cas réalisés avec une valeur faible de T_r , le refoulement du métal et son laminage au cours du formage ont produit un amincissement homogène du bord relevé, caractérisé par une épaisseur quasiment constante e_b . En revanche, l'amincissement n'est pas homogène sur toute la hauteur du bord relevé pour les autres cas. Cette non homogénéité résulte de la liberté du bord durant tout le procédé de relevage (du côté de la surface intérieure de la matrice).

Afin de quantifier l'évolution de l'amincissement, l'épaisseur e_b mesurée à l'extrémité du bord relevé a été considérée. La figure 5 présente l'évolution de l'épaisseur e_b en fonction du taux de réduction T_r .

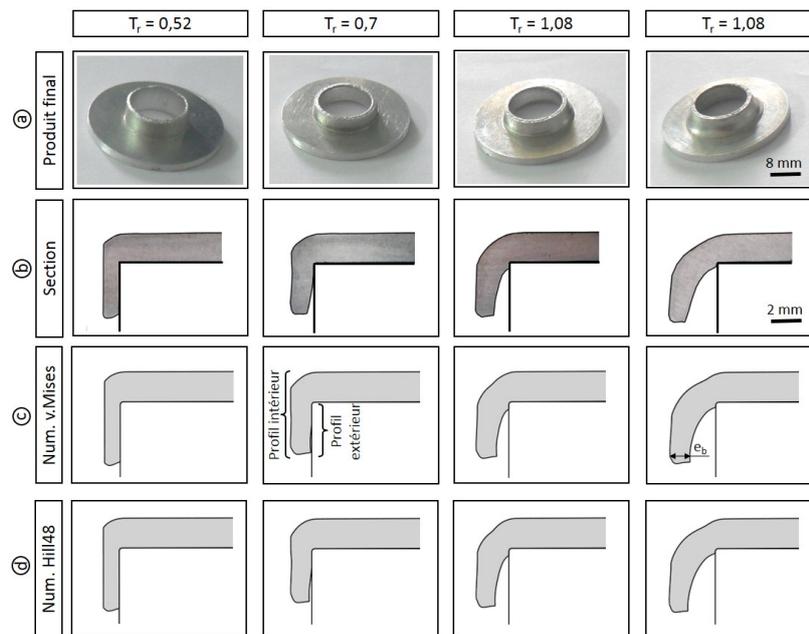


FIGURE 4 – (a) pièces finales. (b) sections pour les différentes valeurs de T_r . (c) et (d) déformées finales numériques

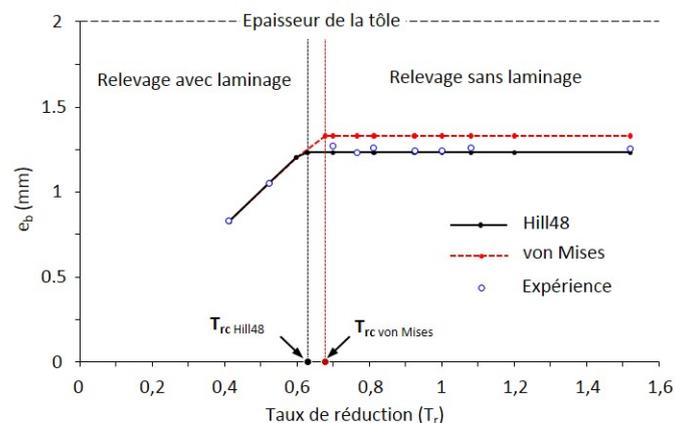


FIGURE 5 – Epaisseur à l'extrémité du bord e_b en fonction de T_r .

Pour les faibles valeurs de T_r , le laminage entraîne une égalité entre le jeu j et l'épaisseur e_b . Par conséquent l'évolution de ce dernier est linéaire en fonction de T_r . Dans ce cas, il n'y a pas de différence significative entre l'expérience et les deux modélisations. En revanche, l'amincissement entraîne une valeur constante de e_b pour les autres cas : 1,35 mm et 1,25 mm pour les modèles basés sur les critères de von Mises et de Hill48, respectivement. La différence entre les deux modèles est cohérente avec la valeur de l'isotropie transverse de la tôle ($\bar{r} = 0,61 < 1$) qui implique une résistance plus faible à l'amincissement. La comparaison entre l'expérience et la modélisation montre que le modèle basé sur le critère de Hill48 donne le meilleur accord avec l'expérience. L'hypothèse de l'isotropie conduit donc à une sur-estimation de l'épaisseur après relevage de l'ordre de 7 %.

Puisque la présence du laminage dépend principalement du jeu entre le poinçon et la matrice et condi-

tionne l'amincissement, l'épaisseur à l'extrémité du bord e_b semble être le paramètre le plus pertinent pour déterminer un taux de réduction critique T_{rc} qui délimite les deux conditions de relevage. Sur cette base, la valeur critique a été déterminée en supposant que la condition de relevage est effectuée avec laminage quand l'égalité est établie entre e_b et le jeu j . Cette condition revient à avoir un contact complet entre le bord relevé et la surface latérale intérieure de la matrice. L'examen de la courbe montre que cette condition est satisfaite à partir de 0,68 pour le modèle basé sur le critère de von Mises et à partir de 0,63 pour le modèle basé sur le critère de Hill48.

La valeur de T_{rc} peut être déterminée aussi par la résolution de l'équation suivante [18] :

$$0,5 e T_{rc}^{2+\bar{r}} + R_p T_{rc}^{1+\bar{r}} - R_{a.t} = 0 \quad (1)$$

Après la résolution numérique de l'équation 1, les valeurs obtenues de T_{rc} pour un matériau supposé isotrope ($\bar{r} = 1$) et un matériau supposé isotrope transverse ($\bar{r} = 0,61$) sont 0,67 et 0,61, respectivement. Ces valeurs sont très proches de la valeur 0,68 prédite par le modèle basé sur le critère de von Mises et de la valeur 0,63 prédite par le modèle basé sur le critère de Hill48.

3.2 Limite de formage dans le cas d'un relevage sans laminage

Un relevage de bord à un taux de réduction T_r égal à l'unité est choisi pour présenter l'analyse de la condition sans laminage. Les paramètres ω (indicateur d'amorçage de la rupture) et f (fraction volumique des cavités) ont été utilisés pour évaluer l'état d'endommagement du bord relevé pour le critère de BW et le modèle GTN, respectivement. La figure 6 présente la distribution de l'endommagement dans le bord relevé.

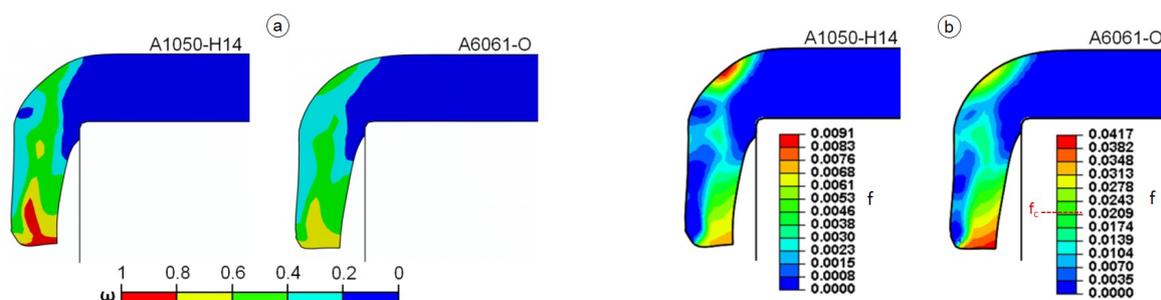


FIGURE 6 – Distribution de l'endommagement dans un bord relevé sans laminage (section du modèle 3D) (a) critère de BW (b) modèle GTN

Pour les deux modèles, des zones d'endommagement sévère ont été observées à l'extrémité du bord et au niveau du raccordement. Cette constatation est corroborée par les observations réelles. En effet un examen au MEB a révélé l'existence de défauts dans ces zones comme l'aspect de peau d'orange et les strictionnements comme le montre la figure 7. La prédiction d'une surface intérieure du bord relevé saine (valeurs de ω et f relativement faibles) est cohérente avec les observations au MEB qui n'ont révélées aucun défaut apparent. Pour le modèle GTN, la fraction volumique des cavités dépasse sa valeur critique dans plusieurs zones pour le cas de l'aluminium A6061-O indiquant le déclenchement de la phase de coalescence pour ce matériau. Ce constat confirme les observations expérimentales montrant des microcavités de grande taille au niveau du raccordement et l'amorçage de déchirures à l'extrémité du

bord comme le montre la figure 7. Il convient de noter que le déclenchement de la phase de coalescence ne peut pas être prédit par le critère de BW.

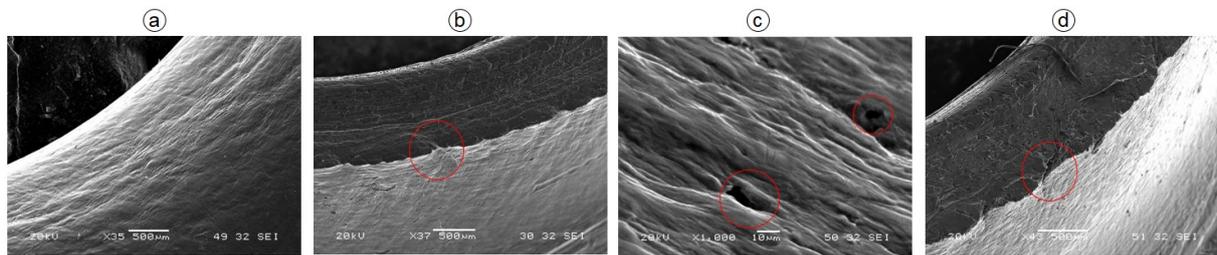


FIGURE 7 – Différents types de défauts observés au MEB : (a) aspect de peau d’orange (b) striction (c) micro-cavités (d) déchirures

3.3 Limite de formage dans le cas d’un relevage avec laminage

Pour analyser les limites de formage dans le cas d’un relevage avec laminage, le procédé a été réalisé avec un taux de réduction T_r égal à 0,5. La figure 8 montre la distribution de l’endommagement pour ce cas.

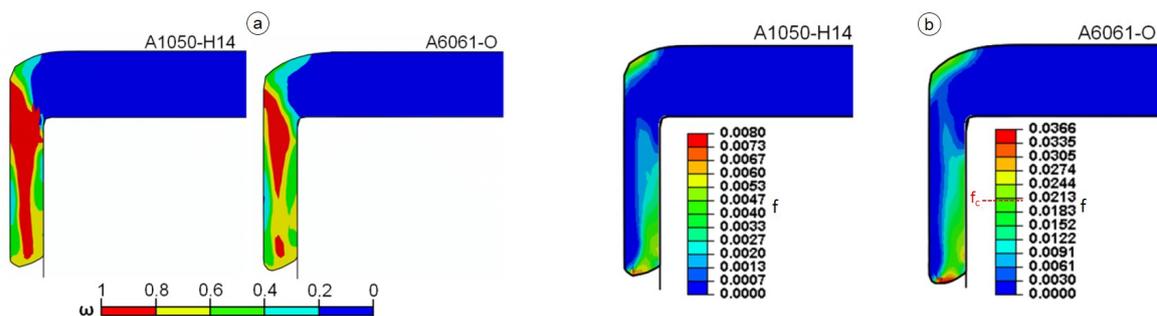


FIGURE 8 – Distribution de l’endommagement dans un bord relevé avec laminage (section du modèle 3D) (a) critère de BW (b) modèle GTN

Pour les deux matériaux, des larges zones caractérisées par un endommagement sévère ont été prédites par le critère de BW. Toutefois, un niveau d’endommagement moins sévère a été prédit par le modèle GTN. La différence entre les deux modèles peut s’expliquer par le fait que le laminage provoque un état de forte compression qui résulte en une évolution négative de la croissance des cavités dans le cas de modèle GTN. Dans ce cas, les cavités tendent donc à se refermer alors que leur fraction volumique f diminue.

Une valeur très réduite de T_r de l’ordre de 0,25 a été considérée pour analyser les limites de relevage dans des conditions très sévères de laminage conduisant éventuellement à la rupture totale du bord. Pour le critère de BW, les simulations numériques ont prédit la rupture totale du bord, ce qui est cohérent avec les observations expérimentales comme le montre la figure 9. Toutefois, avec le modèle GTN des déformations importantes de l’ordre de 3,5 sont atteintes sans prédire de rupture. Ce constat amène à conclure que le modèle GTN ne permet pas de modéliser correctement la rupture du bord. Ce résultat semble être dû au fait que le modèle GTN ne prend pas en compte l’endommagement dû au cisaillement

qui intervient généralement dans la rupture puisqu'il n'y a pas d'évolution de l'endommagement pour un taux de triaxialité nul.

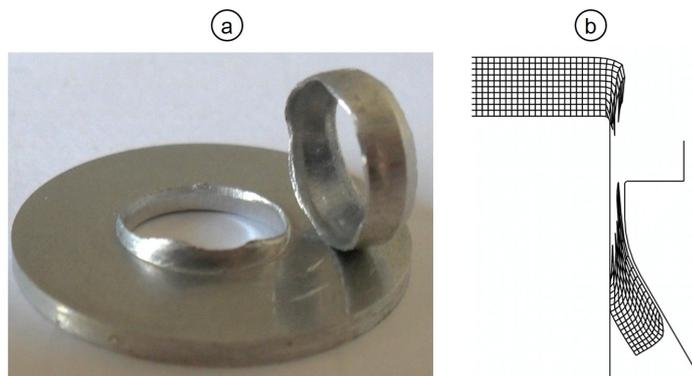


FIGURE 9 – Rupture du bord pour $T_r = 0,25$ (a) expérience (b) EF (section du modèle 3D sans remaillage)

4 Conclusion

Des simulations numériques et des expériences ont été réalisées pour étudier les limites de formage dans le procédé de relevage du bord d'un trou avec et sans laminage. Dans une première partie, un intérêt a été porté à l'analyse de l'effet de taux de réduction sur le procédé de relevage du bord d'un trou. Une valeur critique a été définie pour distinguer clairement les deux conditions. Cette valeur a été déterminée par l'examen de l'épaisseur du bord après relevage en fonction de taux de réduction. L'étude s'est ensuite orientée vers l'identification de la capacité limite de déformation d'un bord relevé. Deux modèles d'endommagement ont été comparés pour déterminer le modèle approprié pour une prédiction précise des limites de relevage. Bien que la simulation par le critère de BW ait montré une bonne aptitude pour décrire la rupture du bord et le risque d'apparition de l'aspect de peau d'orange et des strictions, elle a montré ses limitations lors de la prédiction des microcavités et déchirures. A l'exception d'un cas très sévère de relevage de bord avec laminage, l'approche couplée a donné de meilleurs résultats pour la prédiction de la totalité des défauts au cours et après le relevage dans les différentes conditions et pour les différents matériaux.

Références

- [1] S. Thipprakmas, W. Phanitwong, Finite element analysis of flange-forming direction in the hole flanging process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61 (2012) 609–620.
- [2] S. Oh, C.C. Chen, S. Kobayashi, Ductile failure in axisymmetric extrusion and drawing. Part 2. Workability in extrusion and drawing, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 101 (1979) 36–44.
- [3] H. Takuda, N. Hatta, Numerical analysis of formability of a commercially pure zirconium sheet in some sheet forming processes, *Materials Science and Engineering : A*, 242 (1998) 15–21.
- [4] H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto, N. Hatta, Prediction of forming limit in bore-expanding of sheet metals using ductile fracture criterion, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93 (1999) 433–438.

- [5] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, Criteria for ductile fracture and their applications, *Journal of Mechanical Working Technology*, 4 (1980) 65–81.
- [6] S. Thipprakmas, M. Jin, M. Murakawa, Study on flanged shapes in fineblanked-hole flanging process (FB-hole flanging process) using finite element method (FEM), *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193 (2007) 128–133.
- [7] M. Ayada, T. Higashino, K. Mori, Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials, *Proceedings of the First ICTP. Adv. Technol. of Plast.*, 1 (1984) 553–558.
- [8] K. Chung, N. Ma, T. Park, D. Kim, D. Yoo, C. Kim, A modified damage model for advanced high strength steel sheets, *International Journal of Plasticity*, 27(10) (2011) 1485–1511.
- [9] Y. Bao, Prediction of ductile crack formation in uncracked bodies. Thèse, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2003.
- [10] J. Lemaitre, A continuous damage mechanics model for ductile fracture, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 107 (1985) 83–89.
- [11] H. Badreddine, C. Labergère, K. Saanouni, W. Rajhi, A. Rassineux, D. Kircher, FE elastoplastic damage model with 2D adaptive remeshing procedure for fracture prediction in metal forming simulation, *International Journal of Material Forming*, 1 (2008) 109–112.
- [12] V. Uthaisangsuk, U. Pahl, W. Bleck, Stretch-flangeability characterisation of multiphase steel using a microstructure based failure modelling, *Computational Materials Science*, 45(3) (2009) 617–623.
- [13] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica*, 32 (1984) 157–169.
- [14] A. Kacem, A. Krichen, P.Y. Manach, S. Thuillier, J.W. Yoon, Failure prediction in the hole-flanging process of aluminium alloys, *Engineering Fracture Mechanics*, 99 (2013) 251–265.
- [15] A. Kacem, A. Krichen, P.Y. Manach, Prediction of damage in the hole-flanging process using a physically based approach, *International Journal of Damage Mechanics*, 24(6)(2015) 840–858.
- [16] N. Benseddiq, A. Imad, A ductile fracture analysis using a local damage model, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 85(4) (2008) 219–227.
- [17] A. Krichen, A. Kacem, M. Hbaieb, Blank-holding effect on the hole-flanging process of sheet aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(4) (2011) 619–626.
- [18] A. Kacem, A. Krichen, P.Y. Manach, Characterization of ironing in the hole-flanging process of an aluminum alloy, *Proceedings of the 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (Numisheet 2011)*, Seoul, Republic of Korea 2011 1383 :831–838.