



**HAL**  
open science

# Caractérisation numérique de l'endommagement ductile d'aciers à hautes performances. Essais d'expansion et de pliage.

Wajdi Rajhi, Carl Labergere, Housseem Badreddine, Khemais Saanouni, Alain Rassinieux

## ► To cite this version:

Wajdi Rajhi, Carl Labergere, Housseem Badreddine, Khemais Saanouni, Alain Rassinieux. Caractérisation numérique de l'endommagement ductile d'aciers à hautes performances. Essais d'expansion et de pliage.. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391284

**HAL Id: hal-03391284**

**<https://hal.science/hal-03391284v1>**

Submitted on 21 Oct 2021

**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.

# Simulation numérique de l'endommagement ductile d'aciers à hautes performances. Essais d'expansion et de pliage

W. RAJHI<sup>a,b</sup>, C. LABERGÈRE<sup>a</sup>, H. BADREDDINE<sup>a</sup>, K. SAANOUNI<sup>a</sup>, A. RASSINEUX<sup>c</sup>

a. ICD/LASMIS FRE 2848, UTT – 12 rue Marie Curie BP, 10010 Troyes, France.

b. LMMP, ESST de Tunis – 5 rue Taha Hussein B.P. 56, 1008 Tunis, Tunisie

c. Laboratoire Roberval, UMR CNRS, UTC, BP 20529, 60205 Compiègne, France.

## Résumé :

*Ce travail vise à prédire numériquement la résistance à la rupture ductile d'aciers à haute performance par des essais spécifiques de mise en forme par grandes déformations élastoplastiques (essais d'expansion et de pliage). Le comportement du matériau est décrit par un modèle élastoplastique anisotrope en transformations finies avec écrouissages mixtes non linéaires couplés à l'endommagement ductile isotrope, formulé dans le cadre d'une approche purement locale isotherme. L'identification des constantes matérielles qui interviennent dans le modèle, pour la nuance d'acier étudiée, est réalisée par une double simulation sur un point matériel et sur l'éprouvette de traction. Les simulations 2D utilisent une méthodologie adaptative alliant l'adaptation d'un maillage quadrangulaire basée sur des indicateurs d'erreur appropriés à l'adaptation du trajet de chargement global appliqué par séquences. Le raffinement et déraffinement du maillage repose sur des indicateurs d'erreur en vitesse de variables d'état. Des simulations numériques de pliage en 2D et d'expansion des trous en 3D sont réalisées afin de prédire le lieu et l'instant d'apparition d'une fissure par endommagement ductile afin de caractériser la résistance à la déchirure ductile de l'acier étudié.*

## Abstract :

*This work aims to predict numerically the ductile fracture of some high performance steels by using some appropriate large deformation forming tests (sheet bending, hole expansion). First, the anisotropic elastoplastic model with non linear kinematic and isotropic hardening strongly coupled with ductile damage is presented. This model is written in finite plastic deformation through the so called rotated frame formulation using a non associative plasticity assumption with state variables. After the determination of the material parameters, the model is used within ABAQUS/Explicit to simulate numerically the studied forming tests. First the 2D flanging of a thin tool is performed using a fully adaptive 2D methodology. The second example, performed in 3D with a constant mesh, concerns the expansion of a hole inside a thin sheet until the fracture occurrence.*

**Mots clefs : Plasticité anisotrope en transformations finies, endommagement ductile, simulation numérique, adaptation du maillage, Pliage 2D, Expansion de trous 3D.**

## 1 Introduction

La simulation numérique des procédés de fabrication et de mise en forme des composants mécaniques est aujourd'hui une réalité industrielle. Elle constitue ce qui convient d'appeler le formage virtuel. Plusieurs codes éléments finis généraux ou dédiés à la mise en forme (outils métiers) sont aujourd'hui mis à la disposition de l'ingénieur pour lui permettre de mettre au point et d'optimiser virtuellement les gammes de fabrication. Ces codes, avec l'aide de mailleurs adaptatifs, permettent de simuler aisément divers phénomènes thermomécaniques ; transfert thermique, écoulement plastique écrouissable en grandes déformations, contact-frottement, retour élastique,... Cependant, d'autres phénomènes jouant un rôle important lors du formage par grandes déformations plastiques ne sont pas encore pris en compte dans les codes industriels de calcul des structures. La prise en compte de l'anisotropie induite par l'écrouissage cinématique ainsi que l'amorçage et la croissance d'un endommagement ductile en sont des exemples

typiques. Dans notre laboratoire (LASMIS/UTT) une attention particulière a été accordée à la prise en compte de l'érouissage cinématique et au couplage comportement-endommagement pour mettre au point des outils industriels qui permettent d'optimiser virtuellement des procédés de mise en forme afin soit de retarder l'endommagement et aboutir à une pièce saine sans aucun défaut comme en emboutissage, pliage, forgeage, hydroformage,... soit au contraire de favoriser l'amorçage et la propagation de l'endommagement afin de simuler des procédés de coupe de pièces minces où massives comme le poinçonnage où l'usinage par enlèvement de matière [1-4]. De nombreux autres travaux se sont consacrés à la simulation numérique des procédés de découpage de tôles minces (voir par exemple [6 à 16]). Dans ce travail, nous sommes intéressés à la simulation numérique de l'endommagement ductile dans le procédé de pliage (2D) et au cours d'une opération d'expansion de trous (3D) afin de prédire le lieu et l'instant de l'apparition des fissures compte tenu de l'érouissage mixte non linéaire. Enfin, les résultats de la simulation sont confrontés à l'expérience pour montrer les capacités prédictives du modèle adopté.

## 2 Couplage comportement-endommagement

Le modèle de comportement proposé étant élastoplastique anisotrope en transformations finies couplé à l'endommagement ductile isotrope ; avec une théorie non associée et normale utilisant des normes de contraintes quadratiques et formulé dans le cadre d'une approche purement locale en isotherme. La thermodynamique des processus irréversibles est utilisée comme cadre pour cette formulation. L'écoulement plastique est représenté par les variables  $(\underline{\varepsilon}^e, \underline{\sigma})$ . L'érouissage isotrope est représenté par  $(r, R)$ , l'érouissage cinématique par  $(\underline{\alpha}, \underline{X})$  et l'endommagement ductile est représenté par  $(D, Y)$ .

Après le choix du potentiel d'état dans l'espace des déformations [1-4], les relations d'état qui en découlent s'écrivent sous la forme :

$$\underline{\sigma} = (1-D) \underline{\Lambda} : \underline{\varepsilon}^e \quad \underline{X} = \frac{2}{3} (1-D) C \underline{\alpha} \quad R = (1-D) Q r \quad (1)$$

$$Y = \frac{1}{2} \underline{\varepsilon}^e : \underline{\Lambda} : \underline{\varepsilon}^e + \frac{1}{3} C \underline{\alpha} : \underline{\alpha} + \frac{1}{2} Q r^2 \quad (2)$$

De même, les équations d'évolution de tous les phénomènes dissipatifs dérivent directement d'un choix adéquat du potentiel des dissipations et d'un critère d'écoulement plastique [1-4]. En adoptant un critère anisotrope de type Hill 1948 et un pseudo-potential des dissipations adéquat on obtient:

$$\dot{D}^p = \dot{\lambda}_p \underline{n} \quad \text{avec} \quad \underline{n} = \frac{\underline{H} : (\underline{\sigma} - \underline{X})}{\|\underline{\sigma} - \underline{X}\| \sqrt{1-D}} \quad \dot{\underline{\alpha}} = \dot{D}^p - \dot{\lambda}_p a \underline{\alpha} \quad \dot{r} = \dot{\lambda}_p \left( \frac{1}{\sqrt{1-D}} - br \right) \quad (3)$$

$$\dot{D} = \dot{\lambda}_p \frac{\mathbf{1}}{(1-D)^\beta} \left\langle \frac{Y - Y_0}{S} \right\rangle^s \quad (4)$$

$\underline{H}$  est le tenseur symétrique d'ordre 4 d'anisotropie de Hill qui s'exprime en fonction des six paramètres d'anisotropie :  $F, G, H, L, M$  et  $N$ . Les paramètres  $(a, C)$  et  $(b, Q)$  caractérisent les évolutions des érouissages cinématique et isotrope respectivement. Finalement, les paramètres  $S, s, \beta$  et  $Y_0$  caractérisent l'évolution de l'endommagement isotrope. Le tenseur  $\underline{n}$  défini la normale à la surface de charge et indique la direction de l'écoulement plastique dans l'espace des contraintes. La fonction de charge avec effet de l'endommagement est donnée par :

$$f = \frac{1}{\sqrt{1-D}} \|\underline{\sigma} - \underline{X}\|_H - \frac{1}{\sqrt{1-D}} R - \sigma_y \leq 0 \quad \text{avec} \quad \|\underline{\sigma} - \underline{X}\|_H = \frac{1}{\sqrt{1-D}} [(\underline{\sigma} - \underline{X}) : \underline{H} : (\underline{\sigma} - \underline{X})]^{1/2} \quad (5)$$

Notons enfin que le multiplicateur plastique  $\dot{\lambda}_p$  est donné par la condition de consistance [1-4]. Nous ne dérivons pas son expression car il constituera l'inconnue principale dans le schéma de résolution numérique basé sur un algorithme de prédiction élastique-correction plastique [1-4]. Pour étendre les équations de comportement élastoplastique endommageable développées ci-dessus aux transformations finies, on utilise

une formulation dans un référentiel tournant [17]. Ceci revient à remplacer chaque variable tensorielle du second ordre notée  $\underline{T}^i$  par une variable tournée par la rotation  $\underline{Q}$  :  $\underline{T}_O^i = \underline{Q}^T \underline{T}^i \underline{Q}$  [17].

### 3 Identification des paramètres du modèle

Avant toute utilisation pour simuler quelque procédé que se soit sur un matériau donné, il convient de déterminer les caractéristiques matérielles intervenant dans le modèle de comportement et d'endommagement décrit plus haut. L'enjeu est de déterminer les meilleures valeurs des coefficients donnant une réponse théorique, obtenue par intégration numérique du modèle, très proche de la réponse expérimentale. L'identification des paramètres du modèle passe par deux étapes ; Caractériser un VER (point de Gauss) en utilisant le logiciel **ZéBulon**. Dans la deuxième étape, on utilise l'ensemble des constantes matérielles déterminées dans l'étape précédente pour simuler numériquement sur **ABAQUS/Explicit** les essais expérimentaux en respectant la géométrie de l'éprouvette utilisée (éprouvette lisse de traction plane avec une zone utile de dimensions  $80 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ ). Puis on corrige, le cas échéant, les constantes nécessaires afin que la courbe globale force/déplacement numérique coïncide au mieux avec la réponse expérimentale pour un maillage donné (**M1** :  $h=3.2$  et **M2** :  $h=0.8$ , avec  $h$  est la taille minimale de la maille, type d'élément **C3D8R**). Les résultats de l'identification sur la structure, pour le matériau étudié, dans les directions  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  par rapport à la direction du laminage sont représentés sur les Figures 1.a, 1.b et 1.c et les valeurs correspondantes des paramètres sont : élasticité :  $E=19510^3 \text{ MPa}$ ,  $\nu=0.3$ , plasticité :  $a=380$ ,  $b=4.2$ ,  $C=4910^3 \text{ MPa}$ ,  $Q=410^3 \text{ MPa}$ ,  $F=0.53$ ,  $G=0.47$ ,  $H=0.53$ ,  $L=1.5$ ,  $M=1.5$ ,  $N=1.4$ ,  $\sigma_y=406 \text{ MPa}$ , et pour l'endommagement  $S=120 \text{ MPa}$ ,  $s=1$ ,  $\beta=1.5$ ,  $Y_0=0 \text{ MPa}$  :

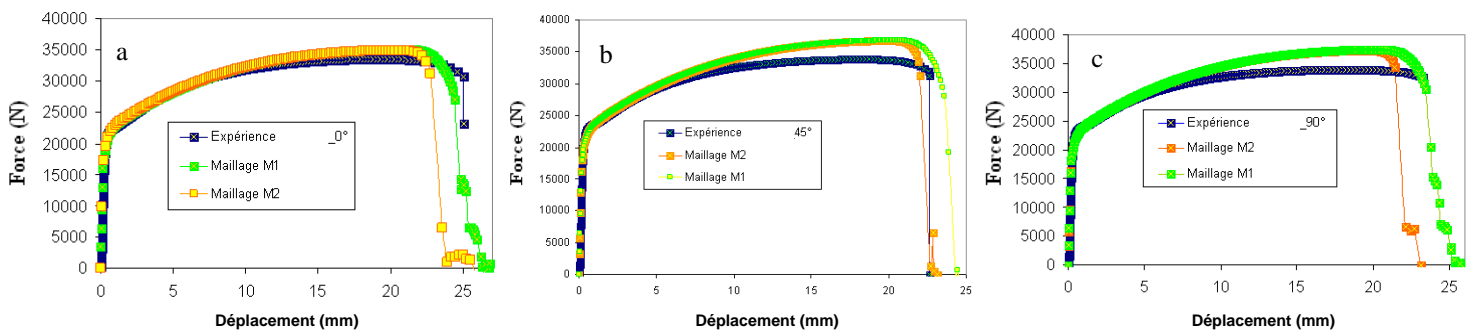


FIG. 1 – Réponses expérimentales et numériques dans différentes directions par rapport à la direction du laminage

### 4 Simulation numérique de l'endommagement dans des procédés de mise en forme

Après avoir déterminé les paramètres du modèle, nous allons nous intéresser dans cette partie à la simulation numérique de deux procédés (pliage 2D et expansion de trou 3D) en utilisant **ABAQUS/Explicit** avec le modèle couplé via une routine utilisateur Vumat. Notons que s'agissant d'un modèle adoucissant et à formulation purement locale, la solution du problème dans le stade post-pic est dépendante de la discrétisation spatio-temporelle du problème. Au lieu de recourir à une formulation non locale [18], nous fixons ici la taille de l'élément dans la zone endommagée par  $h_{\text{dmin}}$  (voir plus loin) qui est déterminée suite à une étude de convergence pendant l'identification [3, 13, 17, 18]. Ainsi, la zone endommagée à comportement adoucissant aura toujours la même taille d'élément pour un matériau donné.

#### 4.1 Procédé de pliage 2D

Le but est d'effectuer un pliage à  $90^\circ$  d'une tôle de  $160 \times 50 \times 2 \text{ mm}^3$  sur des poinçons avec des rayons variables (Figure 2a). Le procédé contient une matrice composée de deux sabots avec une lame de rayon  $R_m=2 \text{ mm}$ , un poinçon avec deux rayons  $R_{p1}=1 \text{ mm}$  et  $R_{p2}=1.5 \text{ mm}$ . Le flan est maintenu par une bride en U (Bridage sur  $50 \text{ mm}^2$ ). Par défaut, le jeu matrice/poinçon est pris égale à  $e+0.1 \text{ mm}$  ( $e$  est l'épaisseur du flan). La matrice est animée d'un déplacement vertical avec une vitesse constante de  $3 \text{ mm/s}$ .

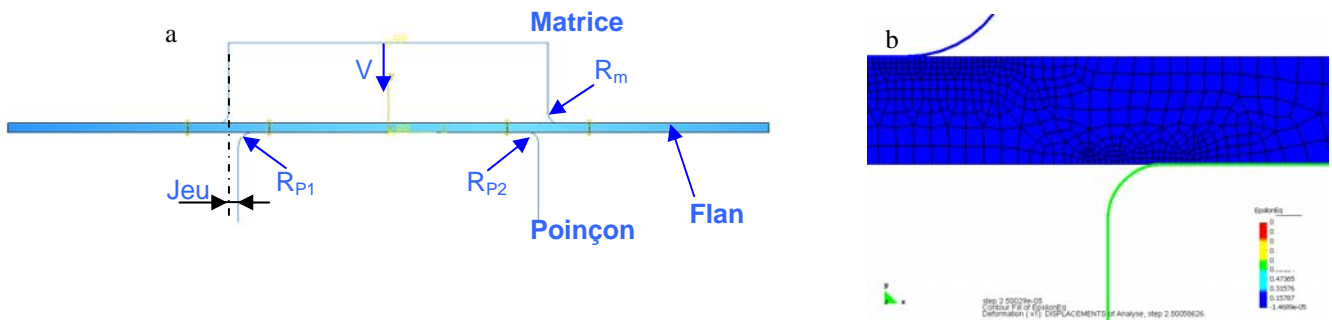


FIG. 2 – Modélisation du procédé de pliage 2D

Ce procédé est modélisé en déformation plane (2D). Le maillage initial du flan est réalisé avec des éléments de types CAX4R avec une taille homogène de 1 mm. Ce maillage initial est adapté dès le premier contact avec les outils (Figure 2b) ainsi qu'en cours de la simulation en fonction de l'évolution des zones plastiques et des zones endommagées grâce au remaillage adaptatif Diamesh\_2D de l'UTC [5, 4]. Les paramètres d'adaptation de ce maillage sont:  $h_{\max} = 1$  mm,  $h_{p\max} = 0.25$  mm,  $h_{p\min} = 0.05$  mm et  $h_{d\min} = 0.005$  mm qui sont des paramètres d'entrée du logiciel d'adaptation de maillage. Les outils (matrice et poinçon) considérés comme rigides indéformables sont discrétisés avec des éléments rigides R2D2 de la librairie des éléments ABAQUS. Les résultats de la simulation du procédé du pliage sont présentés sur la Figure 3 où on montre les isovaleurs de la déformation plastique cumulée à différents instants correspondant à un déplacement de la matrice de  $u = 2.53$  mm (Figure 3a),  $u = 2.59$  mm (Figure 3b),  $u = 2.61$  mm (Figure 3c),  $u = 2.68$  mm (Figure 3d),  $u = 2.80$  mm (Figure 3e) et  $u = 2.89$  mm (Figure 3f). On note qu'un fort gradient de la déformation plastique et de l'endommagement apparaît sur la face supérieure de la tôle (Figure 3a) et conduit rapidement à l'amorçage d'une fissure (Figure 3b) qui se propage dans l'épaisseur du flan (figure 3-c, d, e, f) pour aller à la rencontre d'une deuxième fissure macroscopique qui s'amorce cette fois-ci au niveau de la face inférieure du flan au milieu de la zone de contact poinçon-flan sur le rayon de courbure du poinçon (voir figure 3-e). On note également que le raffinement maximum du maillage se passe toujours à la pointe des fissures alors qu'un déraffinement est opéré par les indicateurs d'erreur après le passage des fissures.

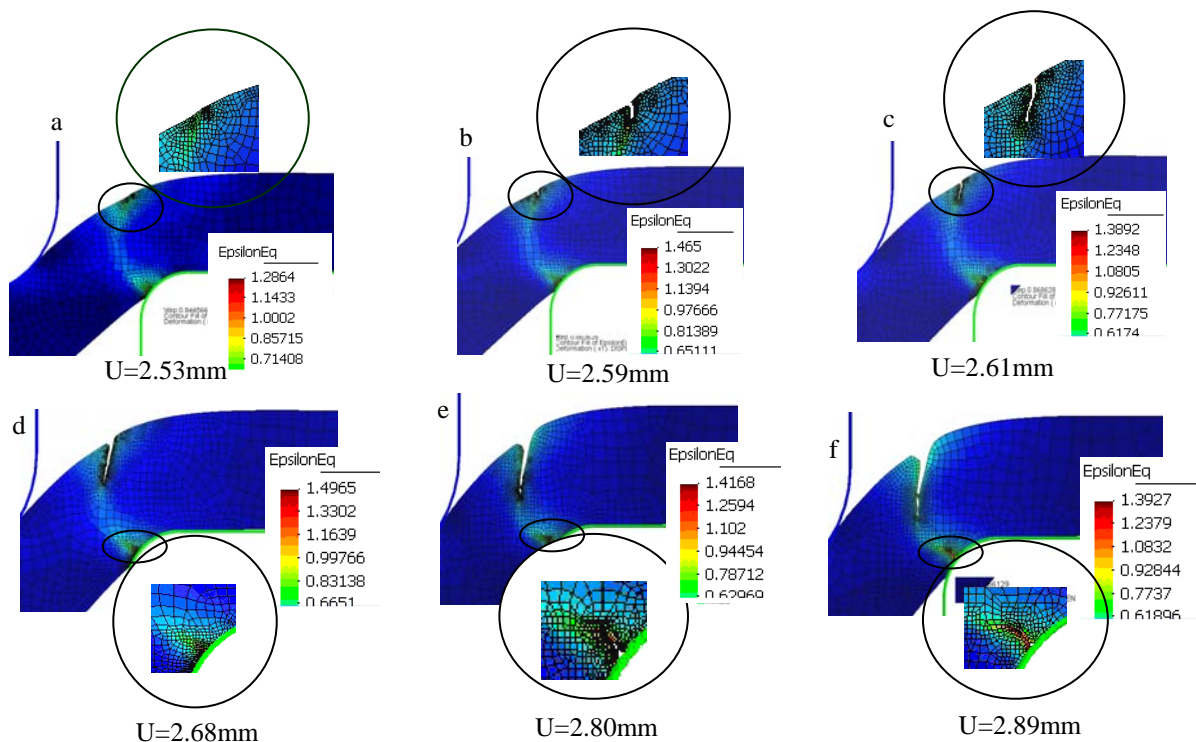


FIG. 3 – Amorçage et propagation des fissures au cours du procédé de pliage avec une analyse adaptative 2D

## 4.2 Essai d'expansion de trous

L'opération s'effectue sur un flan de 75 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur, sur lequel un trou de diamètre 10 mm est réalisé au centre par un simple poinçonnage (Figure 4). Ce flan est embouti par un outil conique se déplaçant à vitesse constante de 10 mm/s jusqu'à l'apparition de fissures sur le bord du trou. Le procédé se compose d'une matrice de 56 mm de diamètre et 5 mm de rayon, d'un poinçon conique de 45 mm de diamètre et d'un angle de 60° et d'un serre flan de 66 mm de diamètre.

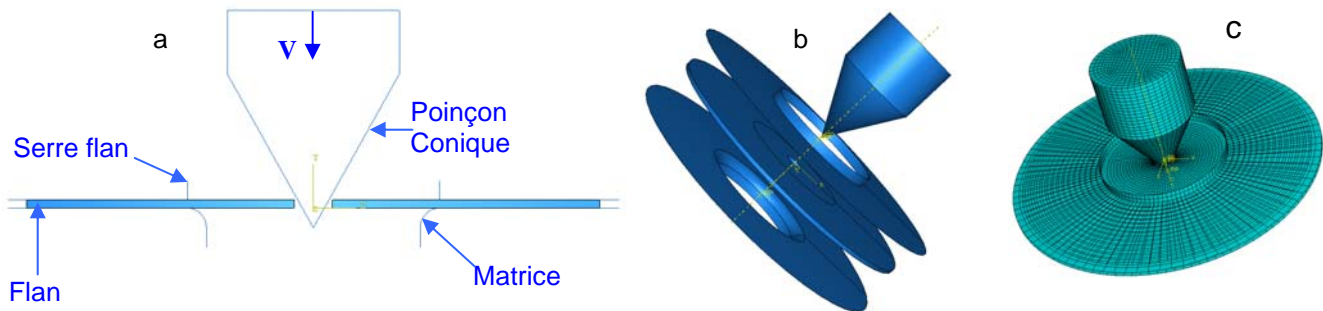


FIG. 4 – Modélisation du procédé d'expansion 3D

Le flan est maillé avec des éléments de type C3D8R de taille constante de 0.8 mm utilisé pendant l'identification. Les outils sont supposés rigides et maillés avec des éléments coques de type R3D4 (figure4-c). Les isovaleurs de l'endommagement (SDV21) pour différentes valeurs de déplacement du poinçon conique sont rassemblées sur la Figure 5. Dès le début, pour un déplacement de 5.5mm, l'endommagement localise sur la face extérieure du flan, figure5-a. Deux premières fissures macroscopiques se forment à  $u=20$  mm (Figure 5d) et plusieurs apparaissent à  $u=22$  mm (Figure 5e). Seules 4 principales fissures continuent à se propager et les autres se bloquent comme le montre la Figure 5f. Ceci est conforme à l'observation expérimentale conformément à la Figure 6.

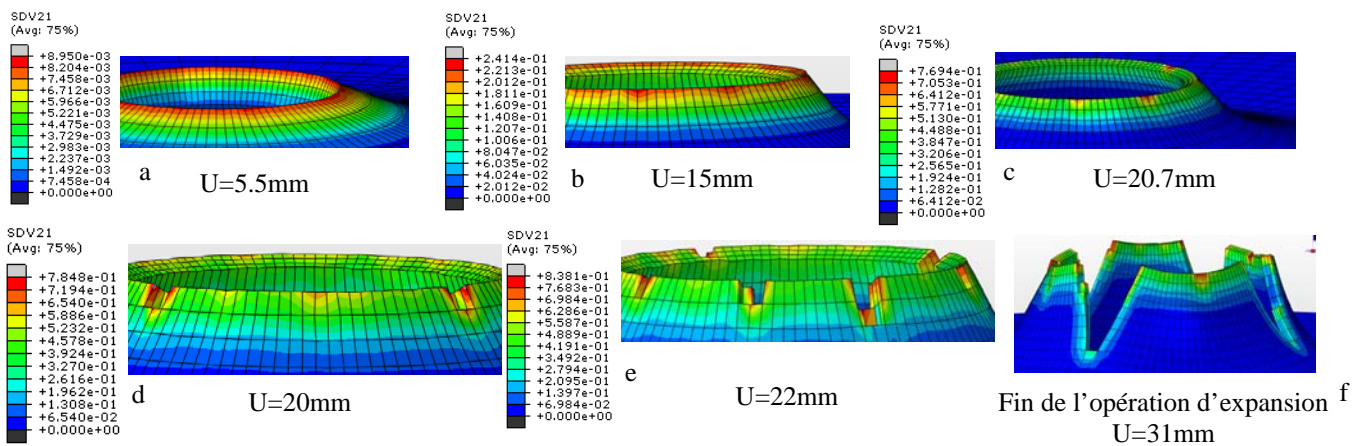


FIG. 5 – Amorçage et propagation des fissures dans le flan au cours d'une opération d'expansion d'un trou

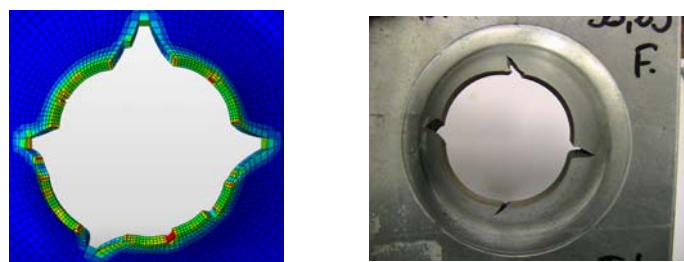


FIG. 6 – Confrontation entre la simulation numérique et l'expérience



## 5 Conclusion

Des simulations 2D et 3D de procédés de mise en forme avec prévision des défauts montrent que le modèle proposé permet de prédire des résultats très comparables aux résultats expérimentaux. En particulier la méthodologie adaptative 2D fonctionne très bien en raffinant et en déraffinant le maillage en fonction d'indicateurs d'erreur pertinents pour prédire la fissuration par rupture ductile. La prochaine étape de ce travail consiste à étendre cette méthodologie adaptative aux analyses 3D.

**Remerciements:** Les auteurs remercient le soutien financier de la société ARCELORMITTAL et en particulier D. Kircher pour les résultats expérimentaux.

## References

- [1] Saanouni, K., Forster C. and Ben Hatira F., On the Anelastic Flow with Damage, *Int. J. Dam. Mech.*, 3, 140-169, 1994.
- [2] M., Khelifa, K., Saanouni, H., Badreddine, M.-A., Gahbiche, and A., Dogui, Plasticité anisotrope couplée à un endommagement ductile isotrope: Application au gonflement hydraulique de tôles minces, *Revue Européenne des Eléments Finis*, 15, 891-908, 2006.
- [3] Badreddine H., Saanouni K., Dogui A., Gahbich M.A., Elastoplasticité anisotrope non normale en grandes déformations avec endommagement. Application à la mise en forme de tôles minces. *Revue Européenne de Mécanique Numérique*, 16, 913-940, 2007.
- [4] C. Labergere, A. Rassineux, K. Saanouni, Endommagement et procédé de mise en forme. Apport du maillage adaptatif, 8th Colloque National en Calcul des Structures, Giens, France, 21-25 Mai, 2007.
- [5] A. Rassineux, Generation and optimization of unstructured tetrahedral meshes by advancing front technique", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 41, 651-674, 1998
- [6] P. Picart, O. Ghouati, J.C. Gelin, Optimization of metal forming process parameters with damage minimization *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81, 597-601, 1998.
- [7] Filice L., Micari F., Pagnotta L., Poggialini A., Numerical prediction of residual stresses in sheet bending and experimental measurement, 6th International Conf. on Technology of Plasticity ICTP, Germany, 1999.
- [8] Brokken D., Brekelmans, W.A.M., Baaijens F.P.T., Discrete ductile fracture modelling for the metal blanking process, *Comp. Mech.*, 26, 104-114, 2000.
- [9] Gooijaerts A., Govaert L. & Baaijens F., Evaluation of ductile fracture models for different metal blanking, *J. Mat. Proc. Tech.*, 110, 312-323, 2001.
- [10] Hambli R., Finite element model fracture prediction during sheet-metal blanking processes, *Eng. Fracture Mech.*, 68, 365-378, 2001.
- [11] Fang G., Zeng P., Lou L., Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in the blanking process, *Journal of Materials Processing Technology*, 122, 249-254, 2002.
- [12] Hatanaka N., Yamaguchi K., Takakura N. Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 139, 64-70, 2003.
- [13] A. Cherouat and K. Saanouni, Numerical simulation of sheet metal blanking process using a coupled finite elastoplastic damage modelling, *Int. J. of Forming Processes*, 06, 7-32, 2003.
- [14] Mkaddem A., Potiron A., Fold zone analysis in wiping die-bending process by using experimental and numerical approaches. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 61, 303-315, 2004.
- [15] M. Brunet, F. Morestin, H. Walter-Leberre, Failure analysis of anisotropic sheet-metals using a non-local plastic damage model, *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 457-470, 2005.
- [16] V. Lemiale, J. Chambert, P. Picart, Description of numerical techniques with the aim of predicting the sheet metal blanking process by FEM simulation, *Journal of Materials Processing technology*, 209, 2723-2734, 2009.
- [17] H. Badreddine, Elastoplasticité anisotrope endommageable en grandes déformations: Aspects théoriques, numériques et applications, Thèse de Doctorat ref: 2006TROY0005, Université de Technologie de Troyes, 2006.
- [18] D. Sornin, Sur les formulations élastoplastiques non locales en gradient d'endommagement, Thèse de Doctorat ref: 2007TROY0011, Université de Technologie de Troyes, 2007.