

# Caractérisation expérimentale et numérique du procédé de poinçonnage

## IV.1 - Etude expérimentale

### IV.1.1 - Outillage et conditions opératoires

Des essais de poinçonnage ont été réalisés en utilisant le montage réalisé dans le cadre des travaux de thèse de R. Hambli [1]. L'outillage est monté sur une presse hydraulique de type MIB de capacité de 100 tonnes (Figure C-1, annexe C), équipée de capteurs d'efforts et de déplacement. Le montage est constitué d'un poinçon et d'une matrice de formes circulaires. La Figure IV-1 montre une représentation schématique de la presse et l'outillage de poinçonnage.

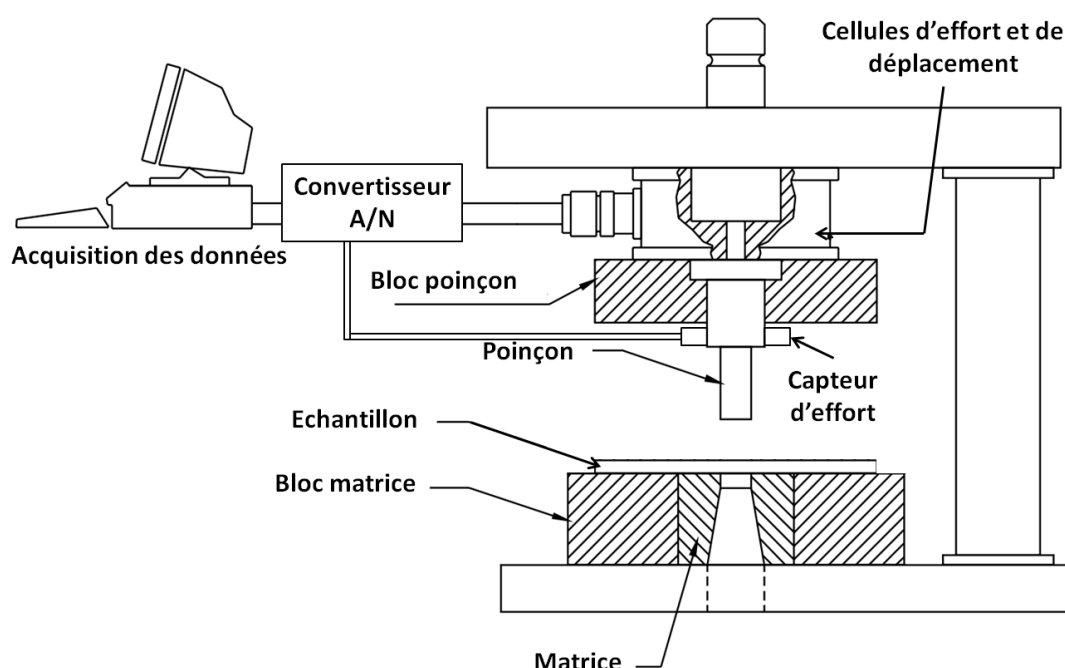


Figure IV-1 : Représentation schématique de la presse et le montage de poinçonnage

Quatre poinçons avec quatre diamètres  $D_p$  différents ont été utilisés afin de faire varier le jeu entre le poinçon et la matrice.

Le jeu normalisé est calculé en pourcentage d'épaisseur de tôle  $e$  par l'expression suivante:

$$J(\%) = \frac{(D_m - D_p)}{2e} 100 \quad (IV-1)$$

Où  $D_m$  est le diamètre de la matrice et  $D_p$  représente le diamètre du poinçon

Tableau IV-1 récapitule les conditions géométriques des poinçons utilisés. Le diamètre de la matrice  $D_m$  est fixé à 40,6 mm. Les rayons des arêtes coupantes du poinçon et de la matrice sont égaux et vaut à 0,01 mm.

L'ensemble des outillages (poinçons, matrices) est traité pour obtenir une dureté moyenne d'environ 60 HRC. La dureté de la tôle étant d'environ 30 HRC.

Un capteur d'effort de type FGS (Fine Guidance Sensor, de référence : FN-2554) de capacité maximale égale à 50 tonnes est encastré dans le bloc du poinçon afin de mesurer directement l'effort appliqué par celui-ci. Le déplacement du poinçon est mesuré par un capteur de position (BALLUFF-BTL 02F9) implanté d'origine sur la presse. Les deux capteurs sont reliés au système d'acquisition qui permet d'enregistrer les données lors des essais. La vitesse de descente de poinçon qui définit la vitesse de découpage est égale à 300 mm/min.

Tableau IV-1 : Jeux utilisés lors de poinçonnage

Condition	Diamètre du poinçon $D_p(mm)$	Jeu $J(%)$
1	40,12	7
2	39,70	13
3	39,34	17
4	38,36	31

#### IV.1.2 - Principe de caractérisation du profil de découpage

Afin de caractériser la qualité du profil de la pièce après poinçonnage, une trentaine d'échantillons ont été préparés pour effectuer des analyses micrographiques. La Figure IV-2 et la Figure C-2-d (annexe C) montrent la géométrie de la pièce obtenue après poinçonnage. La pièce a été découpée soigneusement par tronçonneuse à mi-largeur ( $l/2=45$ ) mm afin d'analyser le profil découpé selon les plans XY (zone 1) et YZ (zone 2).

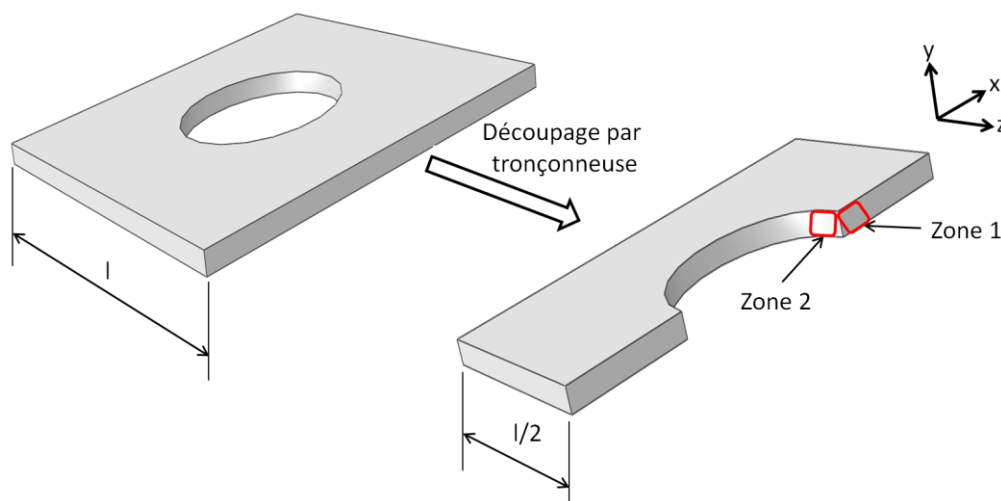


Figure IV-2 : Préparation des échantillons pour les analyses microscopiques

On rappelle que la qualité d'une pièce découpée est caractérisée par :

- une zone bombée  $\Delta_{\text{bom.}}$  ;
- une zone cisailée  $\Delta_{\text{cis.}}$  ;

- une zone arrachée ou zone de rupture  $\Delta_{rup.}$  ;
- une zone de bavure  $\Delta_{bav.}$  ;
- l'angle de rupture  $\beta_{rup.}$ .

Les Figure IV-3 et Figure IV-4 représentent les différentes zones observées sur un bord découpé (J=13%).

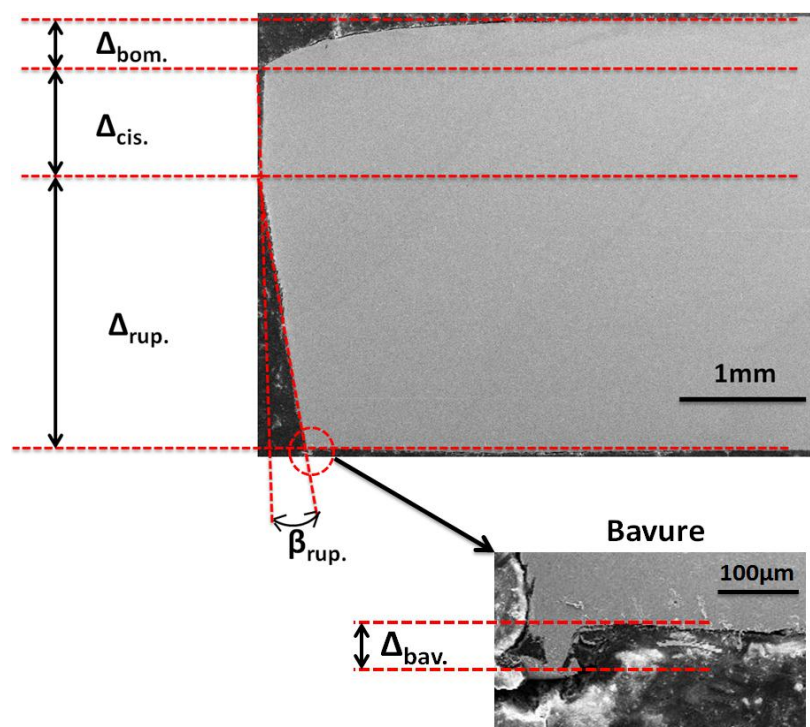


Figure IV-3 : Profil expérimental d'une pièce découpée obtenu par MEB dans la zone 1

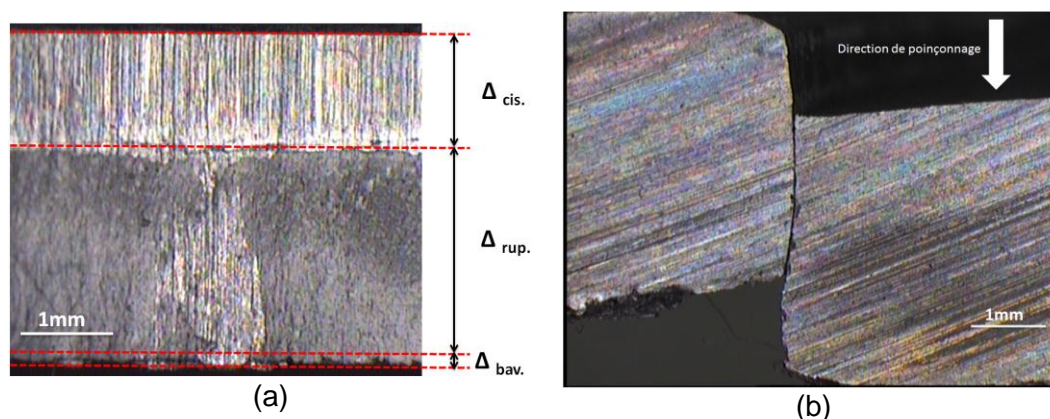


Figure IV-4 : Faciès du bord découpé obtenu par microscope binoculaire : (a) dans la zone 2, (b) dans la zone 1

## IV.2 - Modèle éléments finis

### IV.2.1 - Conditions numériques

Le code Abaqus/Explicit a été utilisé pour simuler le procédé de poinçonnage sous l'hypothèse d'une géométrie axisymétrique. Les conditions de simulation numérique et le maillage initial sont illustrés dans la Figure IV-5. La taille des éléments dans la zone de cisaillement est de  $50 \times 50 \mu\text{m}$ . Des éléments quadratiques axisymétriques à 4 nœuds avec intégration réduite (CAX4R) sont utilisés. Le modèle de frottement de Coulomb est utilisé pour représenter le contact entre la tôle et les outils avec une valeur du coefficient de frottement égale à 0,1. Le poinçon et la matrice sont considérés comme des corps rigides. L'option ALE (Arbitrary Lagrangian Euleurian) [109] est activée pour l'adaptation du maillage afin d'éviter la distorsion des éléments dans la zone la plus sollicitée. Trois modèles de rupture sont utilisés pour tester leur capacité de prédiction pour le procédé de poinçonnage :

- le modèle de GTN, implémenté par défaut dans ABAQUS/Explicit ;
- le modèle de Gurson modifié en cisaillement dont les paramètres sont résumés dans le Tableau III-1 ;
- le critère d'initiation de rupture ductile implémenté par défaut dans ABAQUS/Explicit. La section suivante détaille l'utilisation de ce modèle représenté par l'équation (I-54).

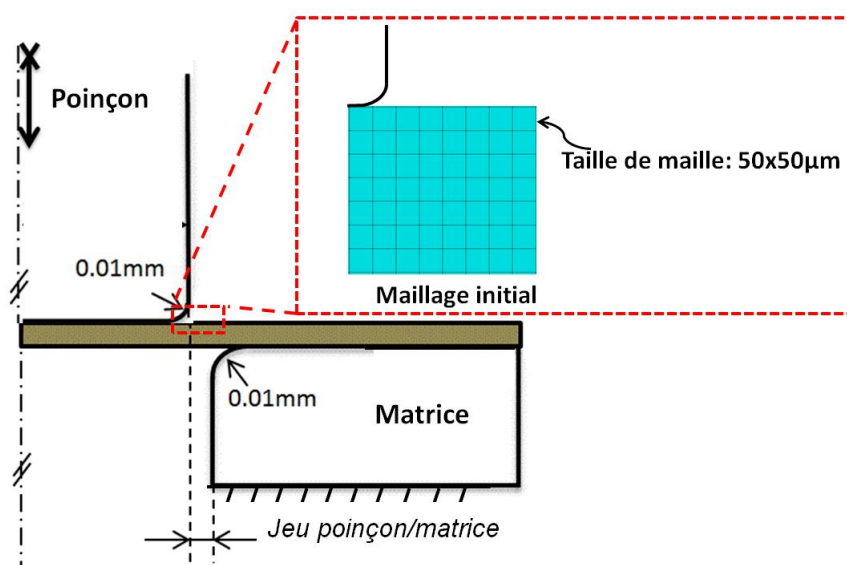


Figure IV-5 : Conditions géométriques du procédé de poinçonnage avec le maillage axisymétrique

### IV.2.2 - Critère d'initiation de rupture ductile

Des prévisions de la rupture dans la phase de fabrication peuvent être obtenues par l'utilisation de l'indicateur de formabilité  $W$  comme le critère d'initiation de rupture ductile [24] :

$$W = \int_0^{\varepsilon_r} \frac{d\bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_r(\eta)} = 1 \quad (\text{IV-2})$$

$\bar{\varepsilon}_r(\eta)$  est donnée par l'équation (III-26).

Dans les procédés de fabrication, où la rupture est précédée par un niveau élevé de déformation plastique, l'indicateur  $W$  peut juger l'amorçage de la rupture ductile. Il est supposé que la rupture commence pour  $W \geq 1$ . Les éléments, pour lequel l'indicateur atteint la valeur critique, sont supprimés (la technique de « *kill element* »).

## IV.3 - Résultats et discussion

### IV.3.1 - Résultats expérimentaux

#### IV.3.1.1 - Processus de création de fissure

Afin de décrire le comportement de la tôle durant le procédé de poinçonnage, des essais interrompus à différents niveaux de pénétration du poinçon ont été réalisés avec la condition  $J(\%) = 13$ . Les échantillons ont été analysés par MEB afin de comprendre les mécanismes de déformation et de rupture dans la zone 1 (Figure IV-2) où la déformation plastique et l'endommagement se localisent. Les clichés de ces observations sont présentés sur la Figure IV-6.

Le trajet de fissure peut être décomposé en deux zones. Une zone lisse où apparaît un décrochement sur la surface de la tôle, représentée par la zone A (Figure IV-6-a, b et c) qui commence à se former parallèlement à la direction de poinçonnage. La fissure est en mode II de chargement (cisaillement). Dans la zone autour de la pointe de la fissure (Zone B, Figure IV-6- d), la fissure se propage selon le mode I de chargement (traction) par une déviation par rapport à la zone cisillée pour former l'angle de rupture  $\beta_{rup}$ . K. Broberg [123] a montré que l'endommagement se limite à une petite région à la pointe de fissure, la **Zone de Processus de Rupture (ZPR)**. Ainsi la bifurcation de fissure se produit dans la ZPR. Dans le paragraphe suivant, les mécanismes de propagation dans la ZPR sont analysés en détail.





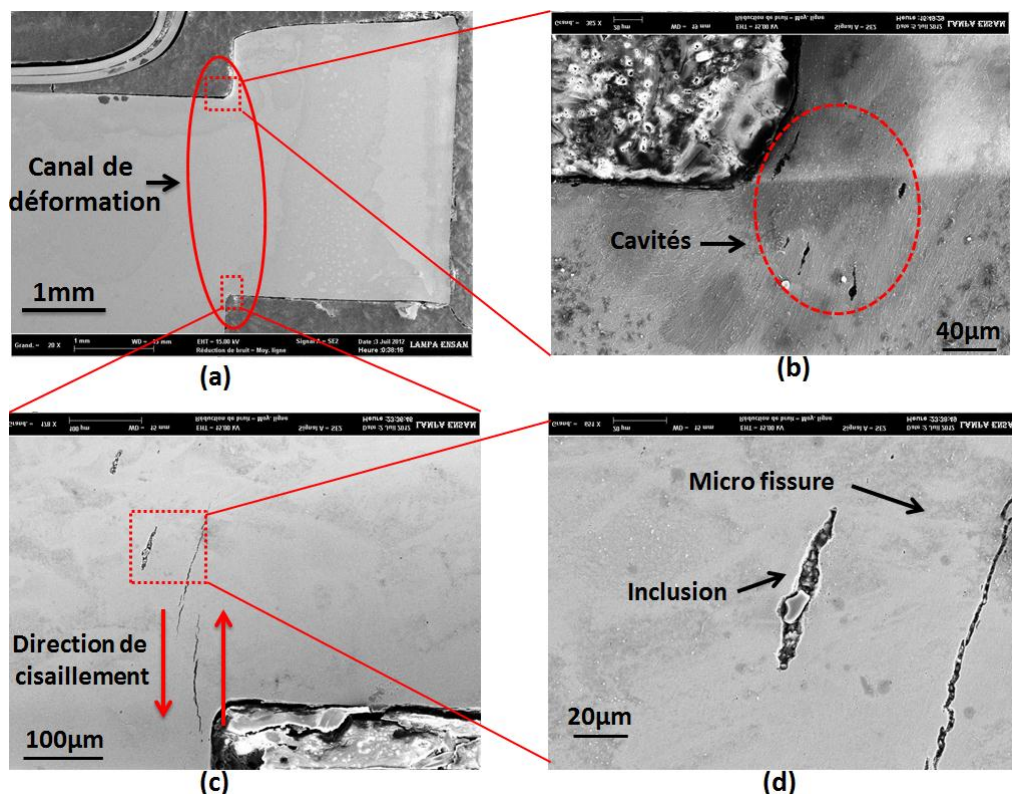


Figure IV-7 : Mécanismes microscopiques de création de fissure(s) à 26.5% de pénétration du poinçon

Les principaux résultats de cette section sont les suivants :

- la fissure se propage dans un canal où le matériau est complètement plastifié ;
- l'endommagement se limite au niveau de la pointe de fissure qui se forme du côté de l'arête de la matrice pour former la zone arrachée et qui représente l'amorçage de rupture;
- Les mécanismes de propagation des fissures sont définis par l'interaction entre les cavités et/ou les micro-fissures. Ces mécanismes affectent localement le chemin de fissure. Ces mécanismes sont similaires à ceux observés à travers les essais de cisaillement in-situ dans le chapitre II.

Ainsi, le trajet de la fissure n'est pas contrôlé par la microstructure locale, mais par les champs de déformation plastique au niveau de la pointe de la fissure. En dehors de la ZPR, aucun dommage n'est causé.

#### IV.3.1.3 - Impact du procédé sur la dureté à proximité du bord découpé

Une série d'essais de micro-dureté (200g) a été réalisée sur des échantillons découpés dans les conditions  $J=13\%$  et  $J=31\%$ . Les échantillons utilisés pour mesurer la micro-dureté sont similaires à ceux présentés en Figure IV-3. L'objectif de ces mesures est d'estimer l'évolution de l'écrouissage le long de la zone cisailée. La Figure IV-8 montre que la dureté diminue en allant du bord vers le cœur de la pièce. Le matériau est affecté par la découpe sur une distance qui dépend du jeu poinçon-matrice (environ  $950\mu\text{m}$  pour le jeu  $13\%$  et supérieur à  $1\text{mm}$  pour le jeu  $31\%$ ). Pour

une distance au bord fixée, la dureté qui reflète l'écouissage est plus élevée pour un jeu plus grand. L'augmentation du jeu entraîne donc une augmentation du niveau d'écouissage et de l'épaisseur de la zone écouissée (déformée plastiquement).

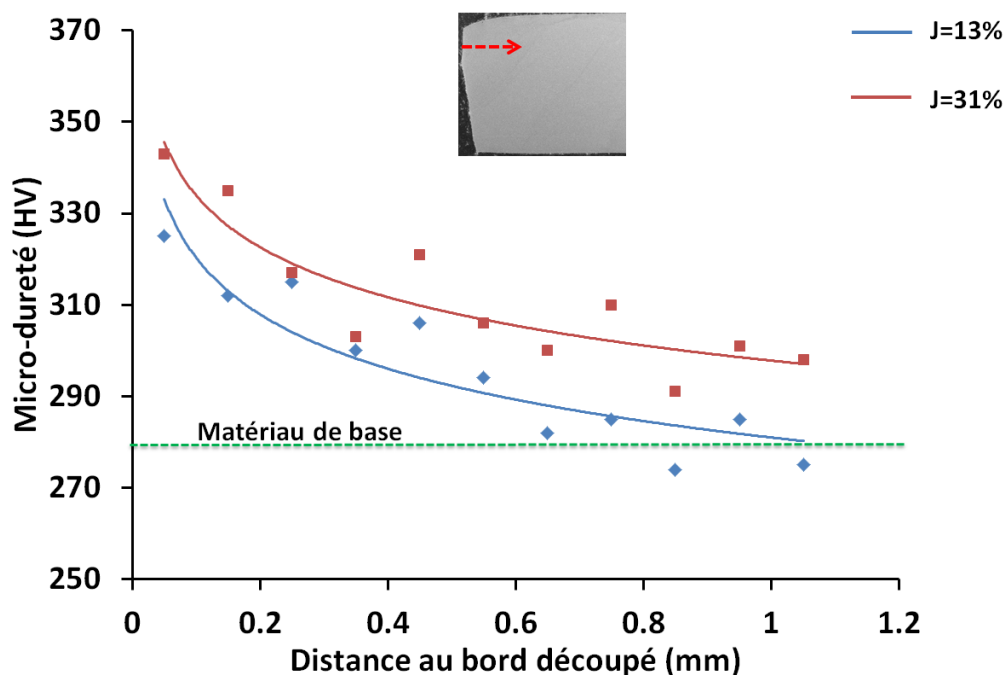


Figure IV-8 : Profil de la micro-dureté à proximité du bord découpé de la zone cisailée

### IV.3.2 - Analyses des courbes effort/pénétration

Les courbes d'effort obtenues lors des essais sont comparées aux résultats numériques du procédé de poinçonnage.

#### IV.3.2.1 - Raideur de la presse

La Figure IV-9 montre une différence importante des pentes qui représentent les parties élastiques de la courbe expérimentale (en rouge) et la courbe numérique (en bleu) pour la condition J=13%. Cet écart est lié à la raideur de la presse  $K_{presse}$ , qui doit être pris en compte pour corriger la courbe expérimentale. Cette correction est similaire à la méthode utilisée dans les références ([124], [125]).

Le déplacement corrigé est donnée par :

$$\Delta x_{corrigé} = \Delta x_{mesuré} - \Delta x_{presse} \quad (IV-3)$$

Avec :

$$\Delta x_{machine} = \frac{F}{K_{presse}} \quad (IV-4)$$



$K_{presse} = 31kN/mm$  est déterminée par minimisation de l'erreur quadratique entre l'effort expérimental et l'effort numérique pour des valeurs variant dans l'intervalle [0-120kN]. La Figure IV-9 montre un exemple de correction de la courbe effort/pénétration en utilisant le déplacement corrigé selon les équations (IV-3) et (IV-4).

Les autres conditions du jeu sont corrigées par une méthode similaire.

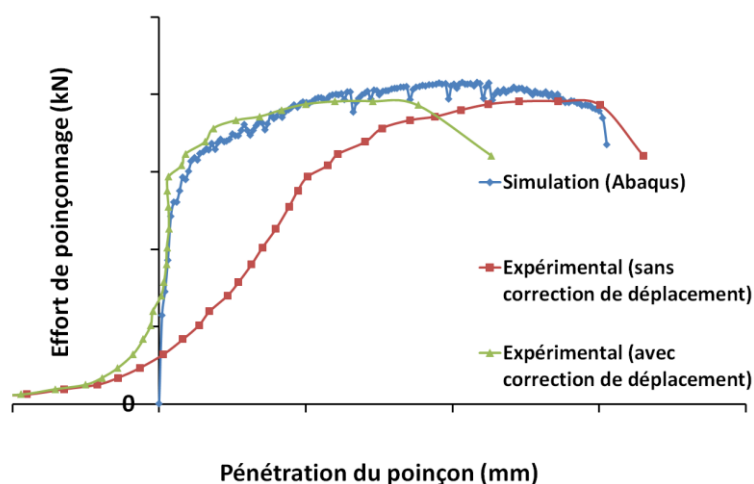


Figure IV-9 : Exemple de correction de la courbe effort / pénétration du poinçon

#### IV.3.2.2 - Allure de la courbe expérimentale effort/pénétration du poinçon

Chaque courbe expérimentale est décomposée en trois principales parties illustrées schématiquement dans la Figure IV-10:

- 1- Portion OA : l'effort du poinçon évolue linéairement. Le comportement du matériau est élastique ;
- 2- Portion AB : il s'agit d'une phase non linéaire correspondant à la déformation plastique avec écrouissage du matériau de la zone de cisaillement entre le poinçon et la matrice ;
- 3- Portion CD : dans cette partie, l'endommagement se développe et évolue rapidement. Une (ou des) fissure(s) s'amorce(nt) au niveau des arêtes coupantes du poinçon et/ou de la matrice. Le début de la chute de la courbe correspond à l'amorçage de fissure(s) qui se propage(nt) rapidement jusqu'à la rupture complète de la tôle.

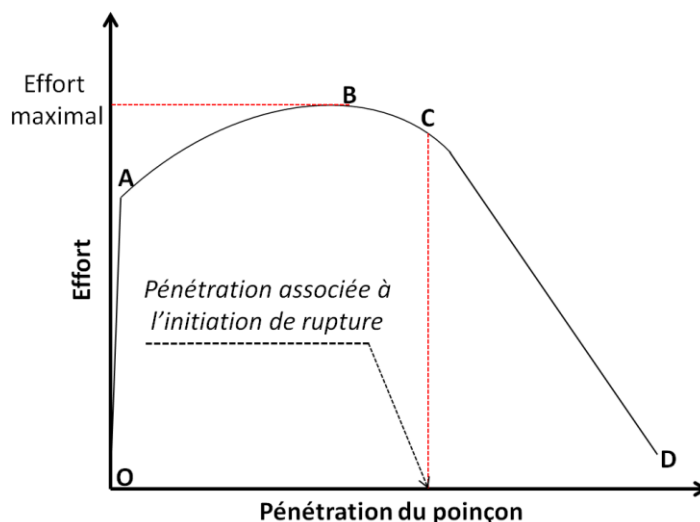


Figure IV-10 : Représentation schématique de l'évolution de la courbe effort/pénétration du poinçon

**Remarque :** l'allure de ces courbes est différente de celle présentée dans la Figure I-3. Les portions de la courbe BC et DE présentées sur la Figure I-3 sont quasi-absentes dans les courbes obtenues ici. L'allure globale des courbes effort/pénétration de la présente étude montrent que la pénétration correspondant à l'effort maximal est proche de celle correspondant à l'amorçage d'une ou de plusieurs fissures.

#### IV.3.2.3 - Prédiction des courbes effort/pénétration du poinçon

Plusieurs simulations numériques ont été réalisées avec les différents jeux testés expérimentalement, afin d'étudier leur influence et de valider les modèles de rupture proposés dans cette étude, en comparant leur niveau de prédiction de l'effort maximal de poinçonnage ainsi que la pénétration associée à l'amorçage de rupture.

La Figure IV-11 montre une comparaison entre la courbe effort/déplacement expérimentale et celles prédites par le modèle de GTN classique, Gurson modifié en cisaillement et le critère d'amorçage de rupture ductile.

L'analyse comparative entre les prédictions obtenues numériquement et les résultats expérimentaux est détaillée dans la section suivante.

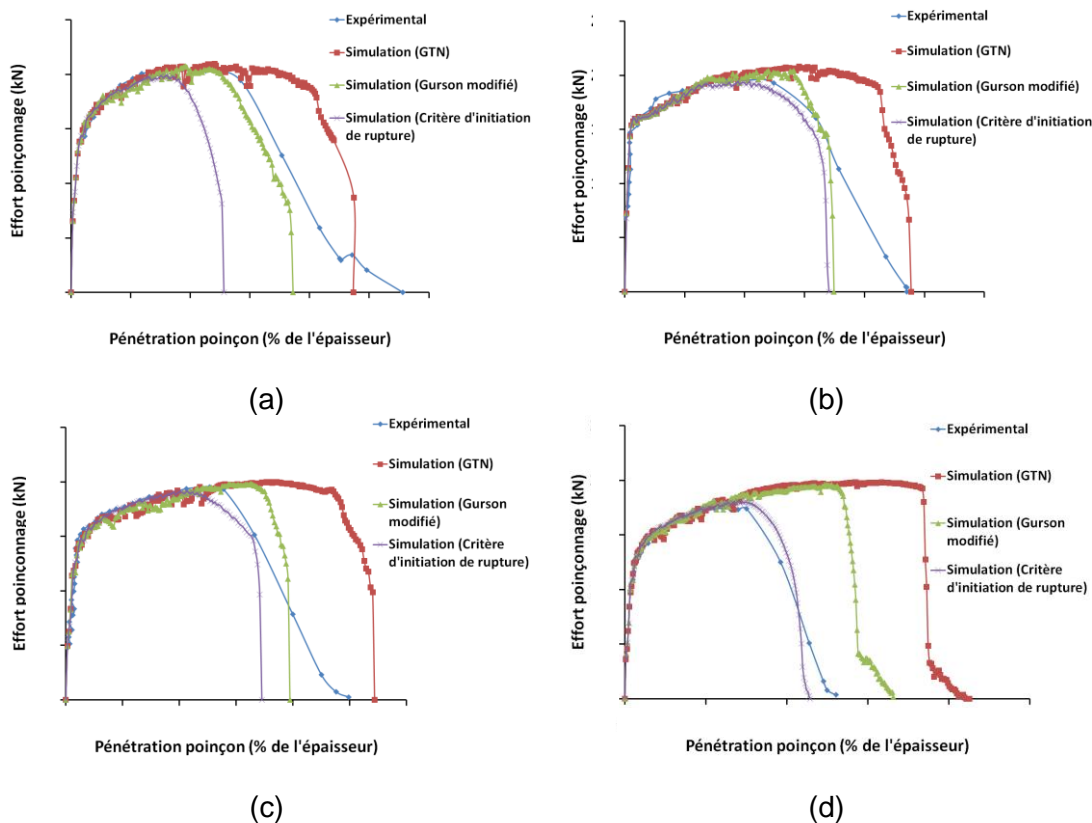


Figure IV-11 : Prédiction de la courbe effort/pénétration : (a)  $J=7\%$ , (b)  $J=13\%$ , (c)  $J=17\%$  et (d)  $J=31\%$

### IV.3.3 - Influence du jeu poinçon-matrice

Le jeu poinçon-matrice est un des paramètres influençant le plus fortement la qualité des pièces obtenues par poinçonnage.

#### IV.3.3.1 - Influence du jeu poinçon-matrice sur l'effort maximal

La Figure IV-12 montre les évolutions de l'effort maximal en fonction du jeu poinçon-matrice, prédites numériquement et comparées avec les résultats expérimentaux. On observe une diminution de l'effort de découpage maximal en fonction du jeu par une chute de 20,3kN (pour le jeu 7%) à 17,4 kN (pour le jeu 31%). Les courbes numériques ont une allure similaire à celle de l'évolution expérimentale pour tous les jeux. Cette allure est conforme aux résultats disponibles dans la littérature et présentés dans le chapitre I. On observe que le critère d'initiation de rupture fournit une prédiction globale acceptable de l'effort maximal par rapport aux deux autres modèles d'endommagement. La prédiction par le modèle de Gurson modifié est améliorée par rapport au modèle GTN classique.

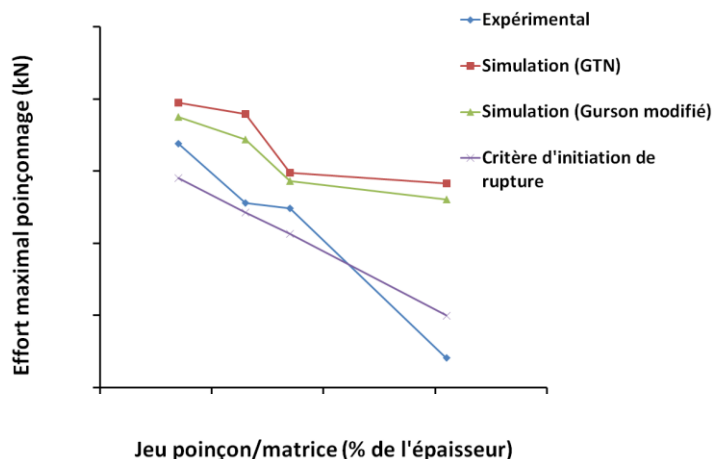


Figure IV-12 : Effet du jeu poinçon-matrice sur l'évolution de l'effort maximal de poinçonnage.

#### IV.3.3.2 - Influence du jeu poinçon-matrice sur la pénétration associée à l'amorçage de rupture

La valeur de pénétration associée à l'amorçage de rupture  $U_r$  est calculé par la formule suivante [59]:

$$U_r = \Delta_{bom.} + \Delta_{cis.} + r_p \quad (IV-5)$$

$r_p$  est le rayon de l'arête coupante du poinçon.

La Figure IV-13 montre un accroissement  $U_r$  en fonction du jeu poinçon-matrice : de 27% de l'épaisseur (pour un jeu de 7%) à 32% de l'épaisseur (pour un jeu de 31%) (courbe bleue). Le Tableau IV-2 récapitule les erreurs de prédiction de la pénétration associée à la rupture par rapport aux résultats calculés expérimentalement. On remarque que le modèle de Gurson modifié prédit bien la pénétration associée à l'amorçage de rupture pour les jeux de 7% et de 13% et moins bien pour le jeu de 17%. La prédiction pour le jeu de 31% est assez éloignée du résultat expérimental. Ces résultats s'expliquent par le fait que le domaine de validité du paramètre  $k_w$  de la loi de Gurson modifié est limité par la plage de triaxialité de contrainte utilisée pour son identification.

Le modèle de GTN classique est incapable de prédire l'amorçage correct de rupture pour tous les jeux. Les erreurs augmentent à 54 % (pour  $J=7\%$ ) et à environ 131% (pour  $J=31\%$ ). Cela est dû à l'insuffisance du modèle pour capturer l'accumulation d'endommagement en cisaillement. Les erreurs de prédiction représentées par le critère d'initiation de rupture diminuent avec l'augmentation du jeu et le critère prédit bien la rupture pour les jeux  $J=17\%$  et  $J=31\%$ , et moins bien pour les deux autres jeux (7 % et 13%).

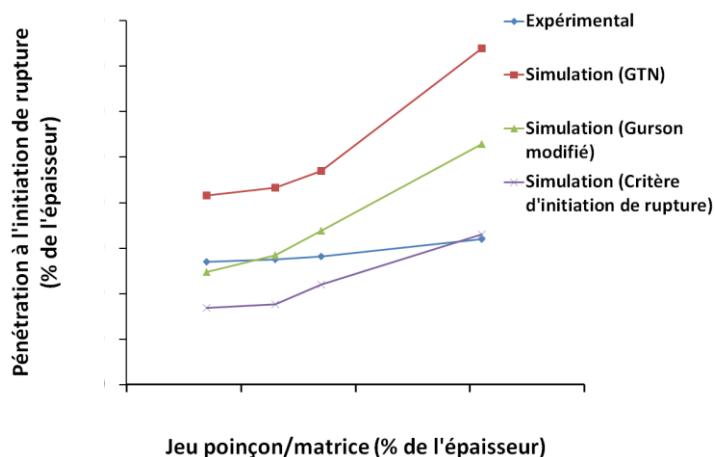


Figure IV-13 : Effet du jeu poinçon-matrice sur la pénétration associée à l'amorçage de rupture.

Tableau IV-2 : Erreurs de prédiction de pénétration (en %) associée à l'amorçage de rupture

<i><b>Jeu</b></i>	<b>7%</b>	<b>13%</b>	<b>17%</b>	<b>31%</b>
<i><b>GTN</b></i>	54,07	57,45	66,66	131,25
<i><b>Gurson modifié en cisaillement</b></i>	8,51	3,27	19,85	65,31
<i><b>Critère d'initiation de rupture</b></i>	37,10	35,63	21,98	3,12

#### IV.3.3.3 - Influence du jeu poinçon-matrice sur l'évolution des zones du profil découpé

La Figure IV-14 représente quelques exemples des profils numériques obtenus après la rupture. On remarque que la zone de bavure est absente pour le jeu 13% et présente pour le jeu 31%. La zone de rupture ainsi que l'angle de rupture sont absents pour le jeu 31% dans le cas de prédiction par le critère d'initiation de rupture. Dans le dernier cas (Figure IV-14-d) on observe l'existence de deux surfaces sur la zone cisailée : une surface concave en haut de cette zone et une zone convexe en bas avant la formation de bavure.



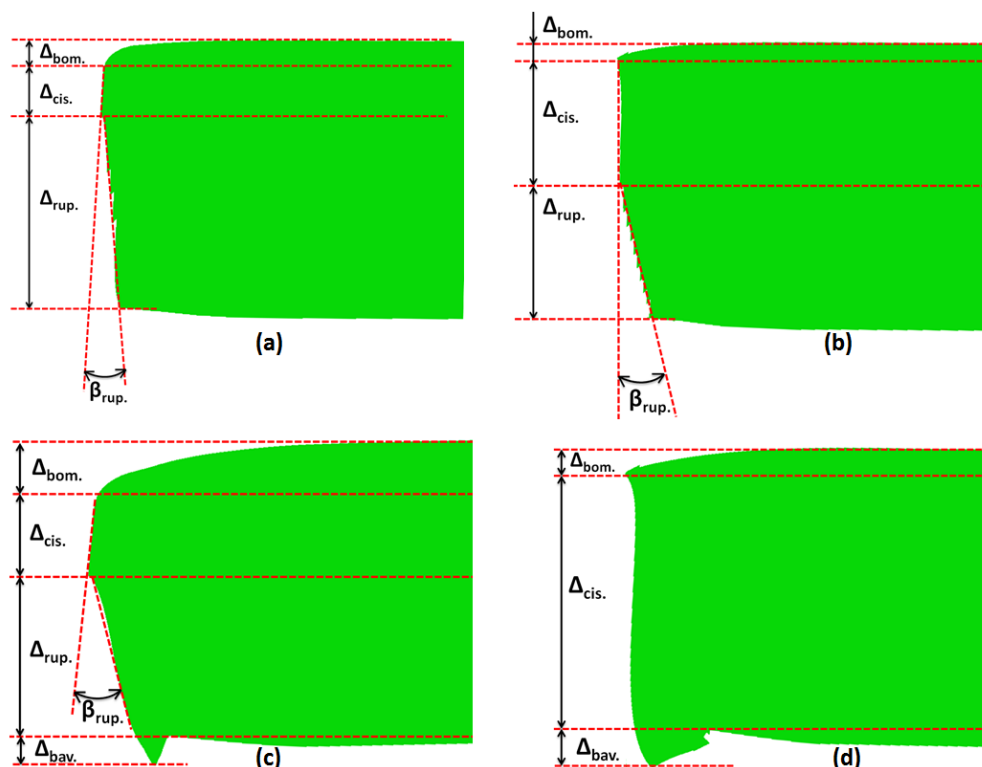


Figure IV-14 : Profils numériques obtenus après rupture : (a) J=13% (Gurson modifié), (b) J=13% (Critère d'initiation de rupture), (c) J=31% (Gurson modifié) et (d) J=31% (Critère d'initiation de rupture)

La Figure IV-15 représente les évolutions des tailles des différentes zones du profil découpé en fonctions des jeux testés. Pour chacun des quatre jeux, les zones du profil découpé représentées dans la Figure IV-3 sont mesurées au MEB. Chaque valeur expérimentale est une moyenne réalisée avec la mesure de cinq échantillons.

La partie bombée (Figure IV-15-a) augmente avec le jeu poinçon-matrice, cela est lié au fait que la flexion de la tôle augmente lorsque le jeu augmente. Nous pouvons observer que dans le cas de la prédiction de l'évolution de la taille de cette zone en fonction du jeu poinçon-matrice, tous les modèles montrent la même tendance d'évolution que l'expérimental (augmentation avec le jeu). Le modèle modifié de Gurson prédit bien la taille de la zone bombée pour les deux premiers jeux avec le critère d'initiation de rupture. En revanche, la prédiction est moins bonne pour les deux autres jeux plus importants.

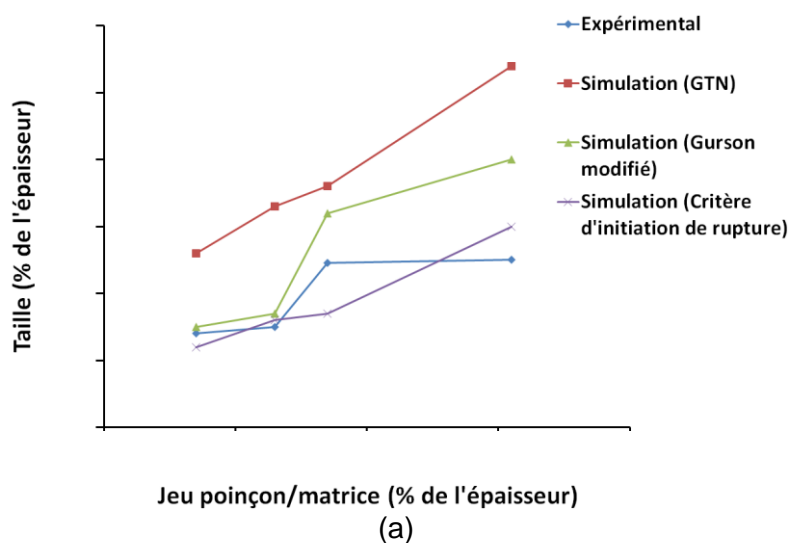
La partie cisailée et celle de rupture (Figure IV-15-b-c) représentent les surfaces les plus dominantes du profil découpé. Avec l'augmentation du jeu, on observe sur les courbes expérimentales (en bleu) que la zone cisailée diminue et que la zone de rupture augmente. Pour les petits jeux, la pression hydrostatique dans la zone de cisaillement est plus élevée ce qui retarde l'amorçage des fissures pour créer la zone arrachée (de rupture). Ces résultats confirment les résultats de la littérature décrits dans la référence [17].

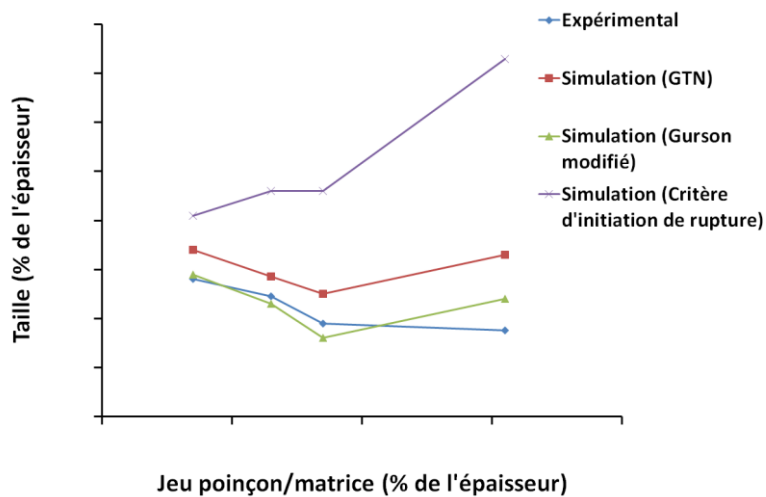
Le modèle de Gurson modifié est un bon accord avec les résultats expérimentaux pour les trois premiers jeux mais n'est pas prédictif pour le jeu le plus important de

31% où l'évolution s'inverse. La prédiction de ces deux parties avec le critère d'initiation de rupture reste assez éloignée des résultats expérimentaux.

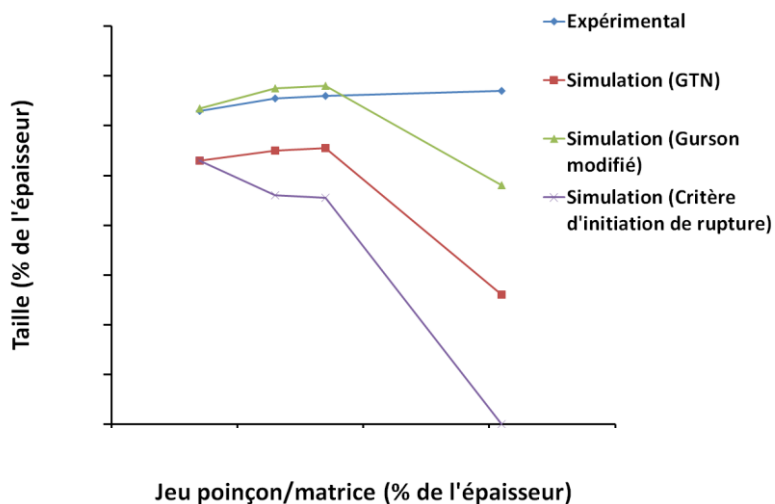
L'évolution de bavure représentée par la Figure IV-15-d montre l'augmentation de cette partie en fonction du jeu poinçon-matrice. La prédiction numérique de la taille de cette zone ne correspond pas aux valeurs expérimentales. En effet, la formation de bavure causée par la découpe est absente pour les jeux inférieurs à 31%. Les éléments endommagés sont totalement supprimés pour les jeux de 7%, 13% et 17%. Dans le cas du jeu de 31%, l'espace est suffisant pour que les éléments puissent se déformer plus librement avec formation d'une bavure de taille significative.

La Figure IV-15-e montre l'évolution de l'angle de rupture en fonction du jeu et les prédictions obtenues par la simulation numérique. La courbe expérimentale ainsi que celles prédites par le modèle GTN et Gurson modifié montrent que l'augmentation du jeu conduit à une augmentation significative de l'angle de rupture et par conséquent, l'obtention d'une mauvaise qualité du profil découpé. On remarque que la prédiction numérique obtenue par le modèle de Gurson modifié est en bon accord avec l'expérimental pour les trois premiers jeux. On observe l'absence de formation de cet angle numériquement dans le cas du jeu 31% (Figure IV-14-d et Figure IV-15-e).

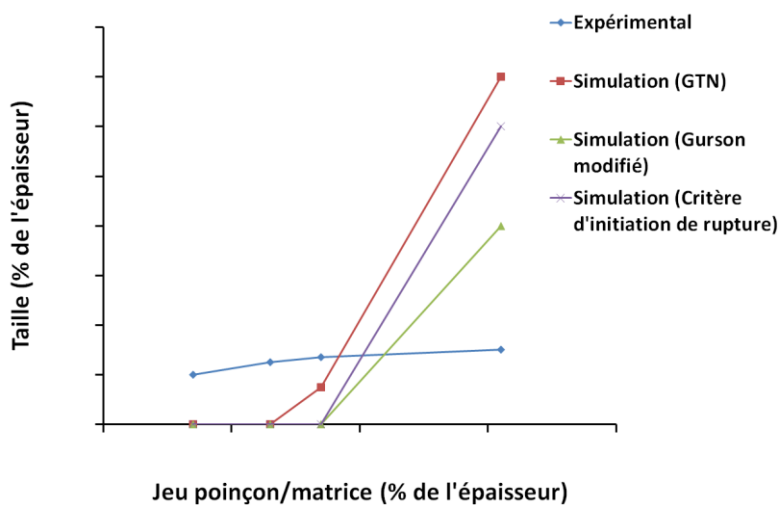




(b)



(c)



(d)

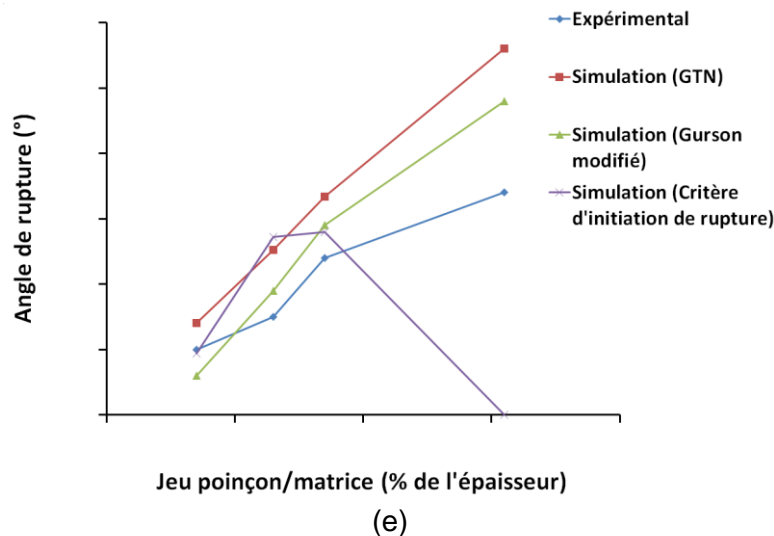


Figure IV-15 : Evolution du profil découpé en fonction du jeu poinçon-matrice : (a) zone bombée, (b) zone cisailée, (c) zone de rupture, (d) zone de bavure et (e) angle de rupture

#### IV.3.3.1 - Conclusion

Après l'étude de l'influence du jeu sur l'effort maximal, sur la pénétration associée à l'amorçage de rupture et sur l'évolution de chaque zone du profil découpé, nous pouvons constater que le choix d'un jeu relativement petit induit une qualité de surface plus lisse en réduisant la zone arrachée, l'angle de rupture et la formation de bavure. Un faible jeu permet donc de limiter les défauts géométriques et l'amorçage des fissures. En revanche, ce choix conduit à des concentrations de contraintes élevées au niveau des arêtes coupantes des outils (matrice et poinçon) [20], qui peuvent causer leur l'endommagement, et demande plus d'effort de poinçonnage. Par conséquent, un jeu optimal doit être identifié pour d'une part, obtenir une qualité de surface avec une partie cisailée acceptable, et d'autre part minimiser la concentration de contrainte dans les arêtes coupantes des outils.

### IV.3.4 - Prédiction des champs de déformation, de contrainte et d'endommagement

#### IV.3.4.1 - Evolution de l'état de contrainte

L'analyse de l'état de contrainte réalisée dans la zone du jeu poinçon-matrice durant la pénétration du poinçon dans le matériau (Tableau IV-3), montre que la triaxialité de contrainte varie dans la gamme de -0,2 à 0,6 en fonction de niveau de pénétration du poinçon et de la valeur du jeu. Le troisième invariant normalisé de contrainte reste constant dans cette zone ( $\xi \sim 0$ ).

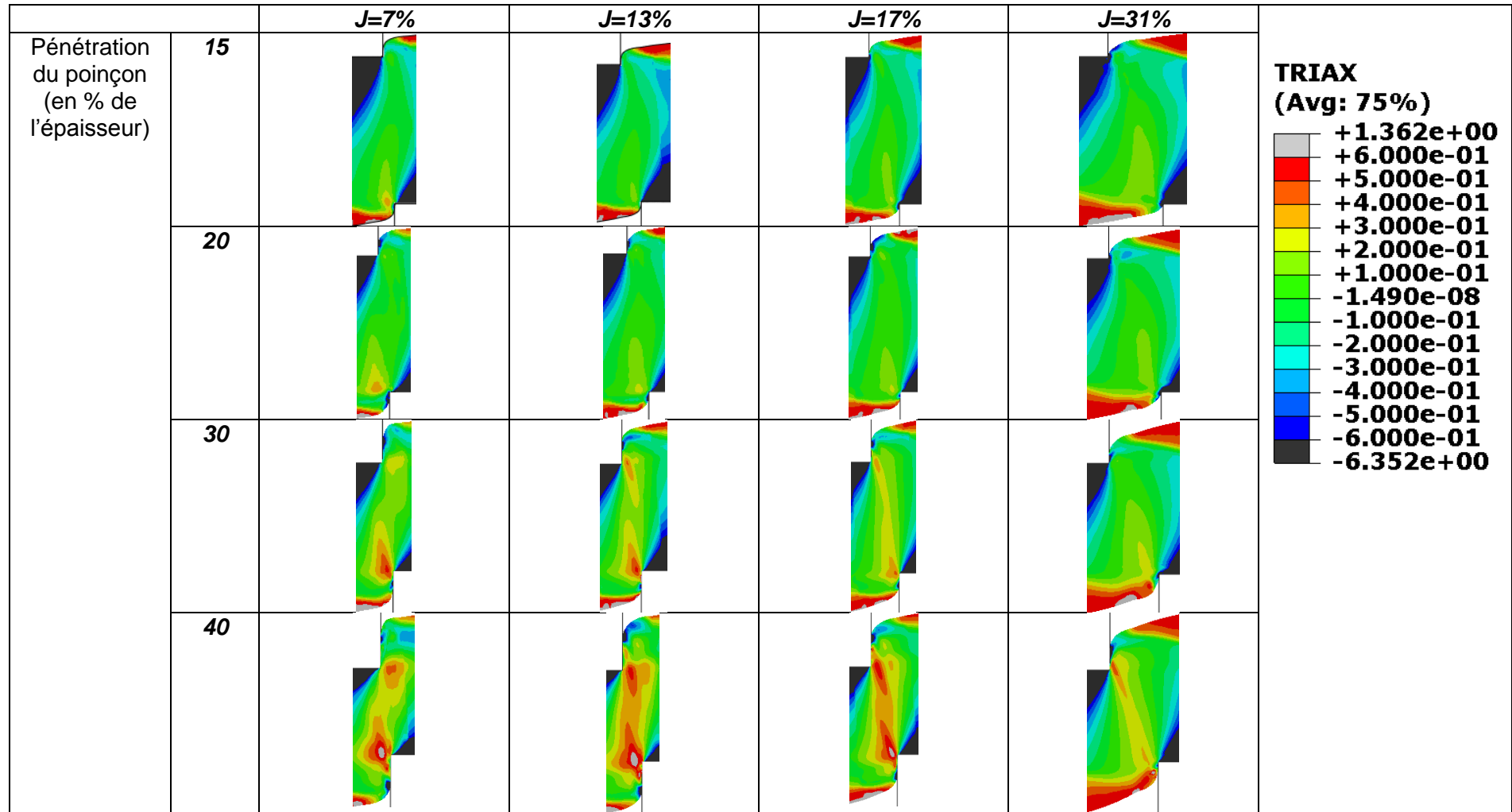
Pour une valeur du jeu donnée, l'état de contrainte associé à une pénétration du poinçon de 15% est similaire au cisaillement simple où la triaxialité moyenne dans la zone concernée ne dépasse pas environ 0,1. Quand la pénétration du poinçon dans le matériau s'accroît jusqu'à 20%, l'état de contraintes évolue vers un état de traction uniaxiale. Une telle tendance se maintient au cours de pénétration du poinçon jusqu'à environ 40% de l'épaisseur de la tôle. L'accroissement de triaxialité de contrainte est plus sensible à proximité de l'arête coupante de la matrice. Celle-ci

peut atteindre le niveau de 0,6 et l'état de contrainte est similaire à celui constaté dans les essais de traction entaillée étudiés dans le chapitre III. Ce phénomène est moins sensible à proximité de l'arête coupante du poinçon.

L'évolution des champs de triaxialité de contrainte des deux côtés des arêtes coupantes, en fonction de l'avance du poinçon, forme une bande localisée qui est le siège de fortes sollicitations favorisant l'amorçage et la propagation des fissures.



Tableau IV-3 : Evolution de la triaxialité de contrainte en fonction de la pénétration du poinçon pour les différents jeux



#### IV.3.4.1 - Evolution de déformation plastique équivalente

Le Tableau IV-4 présente la distribution de la déformation plastique équivalente pour différents stades de pénétration du poinçon et pour chaque valeur du jeu poinçon-matrice. Pour chaque condition, nous constatons l'apparition d'une bande de localisation des déformations plastiques au niveau des contacts des arêtes coupantes des outils (poinçon et matrice) avec la tôle. Avec l'avance du poinçon, cette bande se propage des deux côtés dans l'épaisseur de la tôle pour former un canal de déformation plastique dont la taille dépend du jeu poinçon-matrice. Nous obtenons des champs de déformation plastique équivalente plus importants pour une pénétration plus avancée et un jeu plus réduit. Cette région est caractérisée par un niveau d'écouissage du matériau très élevé qui précède la phase d'endommagement.

Afin d'étudier l'impact du procédé sur le bord découpé après rupture complète il a été proposé d'évaluer le niveau et la taille de la zone écouie. La Figure IV-16 montre que la déformation plastique équivalente diminue en allant du bord découpé vers le cœur de la pièce ce qui confirme les valeurs de micro-dureté présentées en Figure IV-8. La comparaison des résultats de deux jeux a permis de constater que le jeu influe sur la profondeur affectée. En effet, l'augmentation du jeu de 13% à 31% conduit à une profondeur affectée plus étendue de 29%. La réduction du jeu permet de localiser les valeurs élevées de l'écouissage du matériau à proximité du bord découpé. La déformation plastique équivalente est diminuée de 70% à 0,7 mm du bord. Cela permet de réduire la probabilité de fissuration.

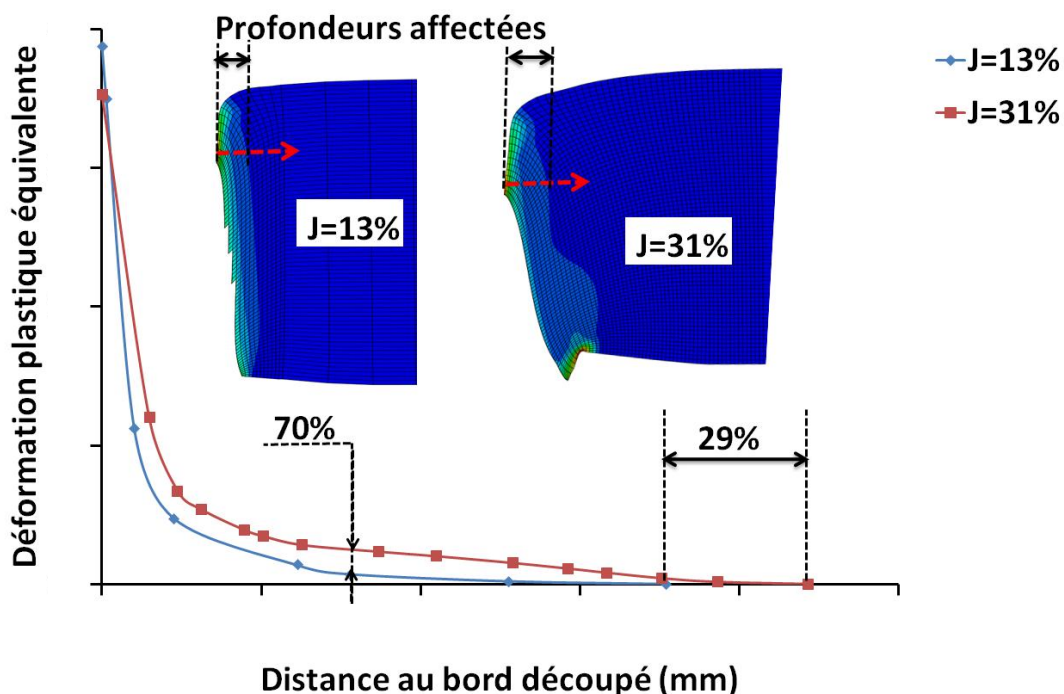
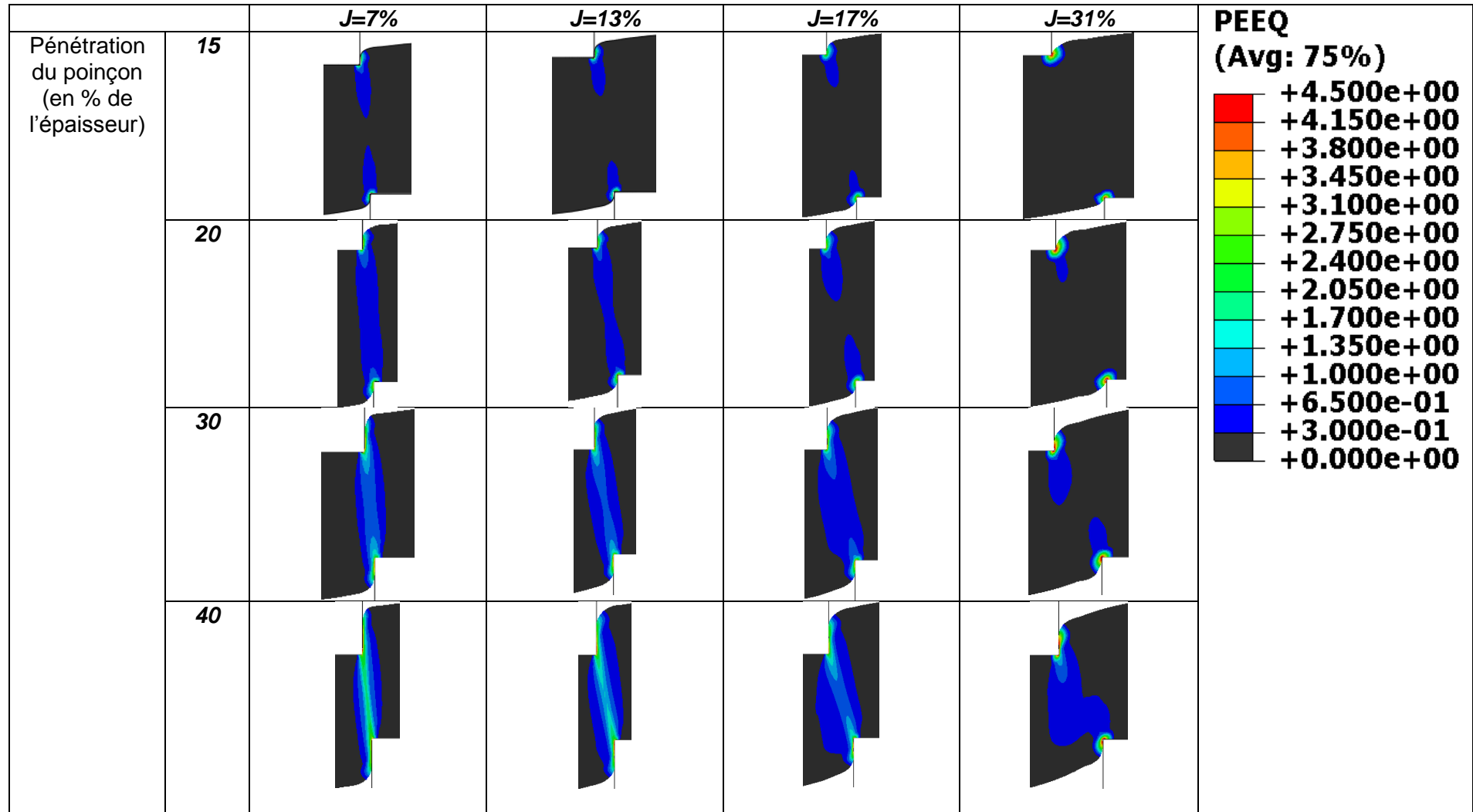


Figure IV-16 : Evolution de déformation plastique équivalente dans la région la plus affectée de la zone cisailée

Tableau IV-4 : Evolution du champ de déformation plastique équivalente en fonction de la pénétration du poinçon pour les différents jeux



#### IV.3.4.2 - Prédiction de l'endommagement et de la rupture

La Figure IV-17 montre la distribution des paramètres l'endommagement (WF pour GTN, SDV13 pour Gurson modifié et DUCTCRT pour le critère d'initiation de rupture) en fonction de certains niveaux de pénétration pour la condition  $J=13\%$ .

Les simulations par éléments finis ont montrés dans la section précédente que les déformations plastiques se localisent dans la zone de cisaillement. Lors de cette localisation, le déplacement du poinçon induit une localisation d'endommagement dans cette zone. L'endommagement croit localement jusqu'à une amplitude suffisante pour provoquer une défaillance interne du matériau et par conséquence induire la rupture le long de l'épaisseur.

La prédiction de l'endroit d'amorçage de la première fissure dépend du modèle utilisé. En effet, le modèle GTN, qui a surestimé la pénétration associée à l'amorçage de rupture, montre que la fissure s'initie en bas du côté de l'arête coupante de la matrice et se propage dans la direction du contact de la tôle avec l'arête coupante du poinçon (Figure IV-17-a).

Les prédictions obtenues par le modèle de Gurson modifié sont présentées sur la Figure IV-17-b et la Figure IV-18. L'endommagement s'accumule et commence à croître au niveau de l'arête coupante de la matrice (5% de pénétration) et au niveau de l'arête coupante du poinçon (10% de pénétration). Quand la fraction volumique des cavités atteint sa valeur de rupture (25%), la rupture s'amorce du côté de l'arête coupante de la matrice à 28,5% de pénétration du poinçon. Elle se développe pour rejoindre une autre fissure créée au niveau de l'arête coupante du poinçon à 33% de pénétration du poinçon. Les deux fissures se propagent vers le centre de l'épaisseur qui conduit à la rupture totale du matériau. L'endroit de rupture simulé numériquement est en bon accord avec les observations expérimentales montrées dans la Figure IV-6.

L'évolution de la fraction volumique des cavités est plus rapide dans le cas du modèle de Gurson modifié que dans le cas du modèle de GTN (Figure IV-19). Cette accélération importante de de la fraction volumique des cavités est due à l'accumulation d'endommagement induit par le terme de cisaillement implémenté dans ce modèle modifié de Gurson et négligé par le modèle de GTN.

Pour le critère d'initiation de rupture (Figure IV-17-c et Figure IV-20), la rupture est contrôlée par le paramètre DUCTCRT, équivalent au paramètre  $W$  dans l'équation (IV-2). Lorsque le poinçon commence à pénétrer dans le matériau, la valeur de  $W$  augmente dans la zone entre les arêtes coupantes des outils avec l'augmentation de la déformation plastique (Tableau IV-4). Les valeurs les plus élevées sont observés à proximité des arêtes coupantes des outils. Pour une pénétration du poinçon égale à 17,7% de l'épaisseur, l'indicateur  $W$  atteint sa valeur maximale ( $W=1$ ) à proximité de l'arête coupante du poinçon provoquant l'amorce de la rupture à cet endroit, ce qui est en contradiction avec les observations expérimentales. A 30% de pénétration du poinçon, une fissure apparait du côté de l'arête coupante de la matrice. Le processus de rupture se développe des deux côtés jusqu'à la rupture totale à 34% de pénétration du poinçon (Figure IV-20).

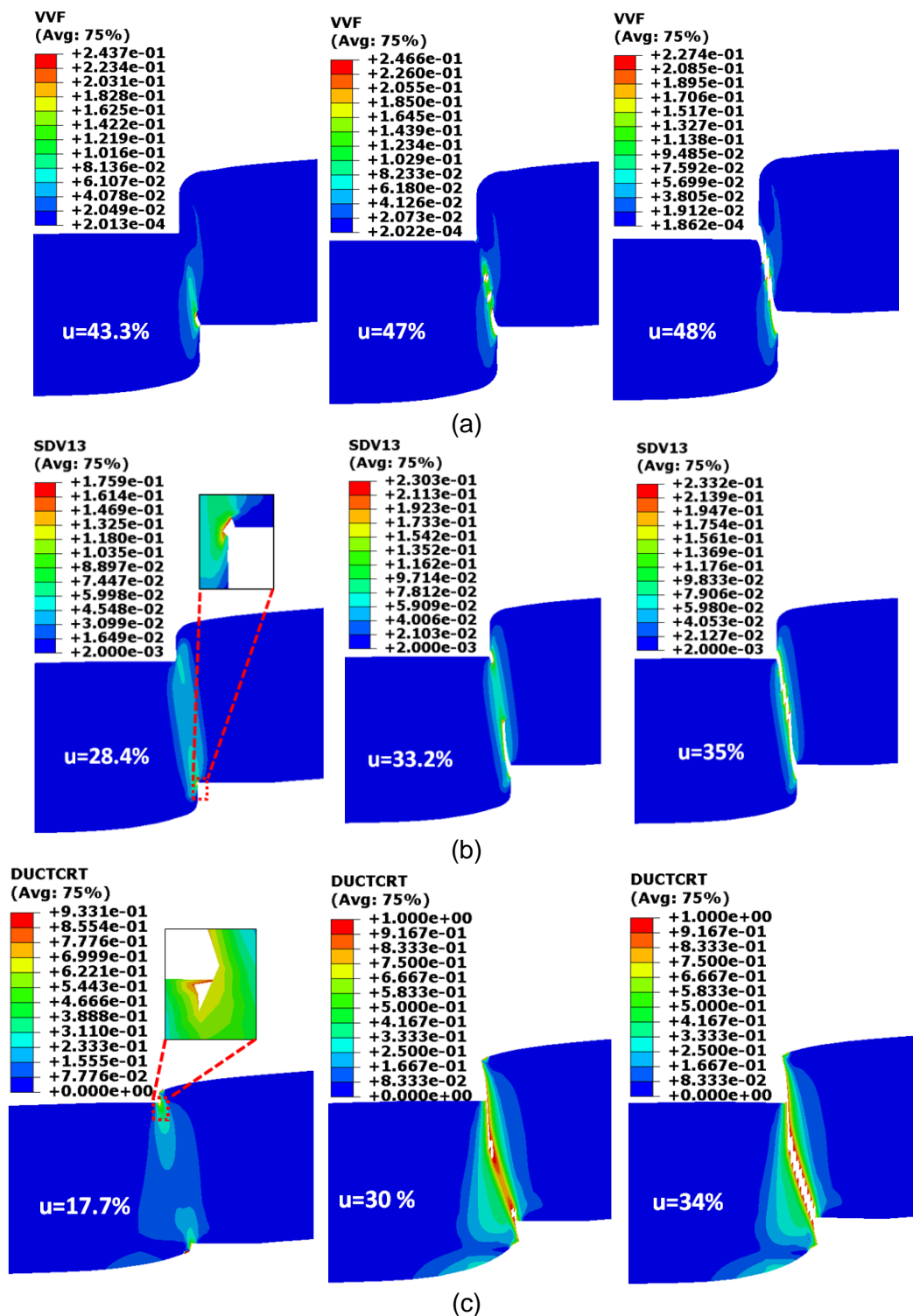


Figure IV-17 : Distribution de l'endommagement pour différents stades de pénétration du poinçon (J=13%) : (a) GTN, (b) Gurson modifié et (c) critère d'initiation de rupture



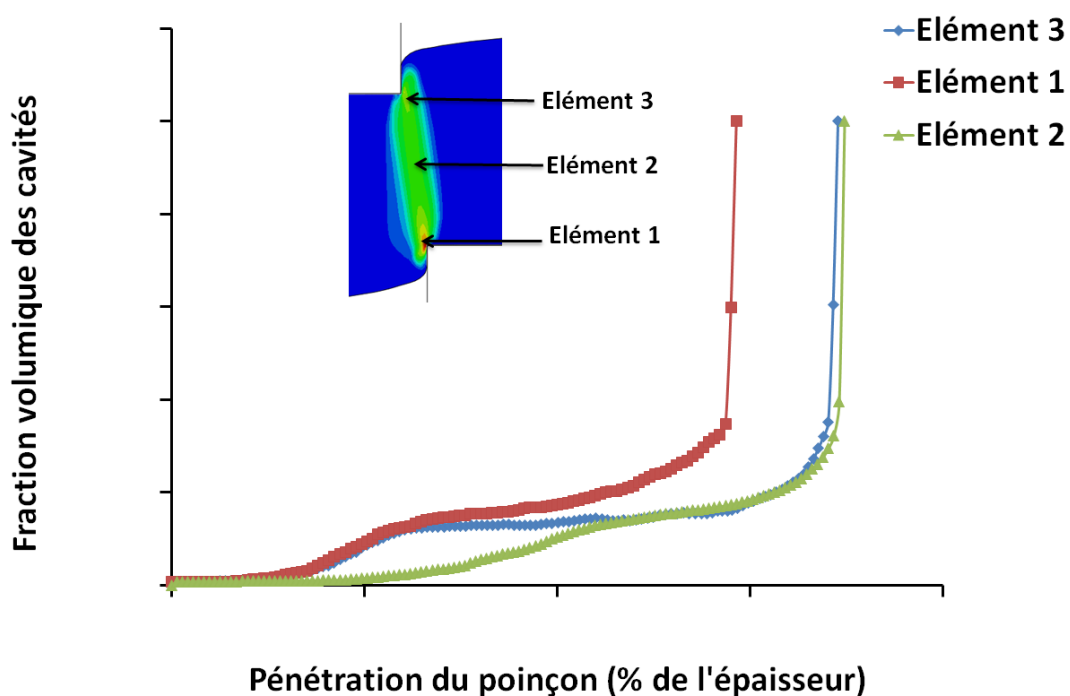


Figure IV-18 : Evolution de la fraction volumique des cavités dans trois éléments de la zone de cisaillement obtenue par le modèle de Gurson modifié pour la condition  $J=13\%$

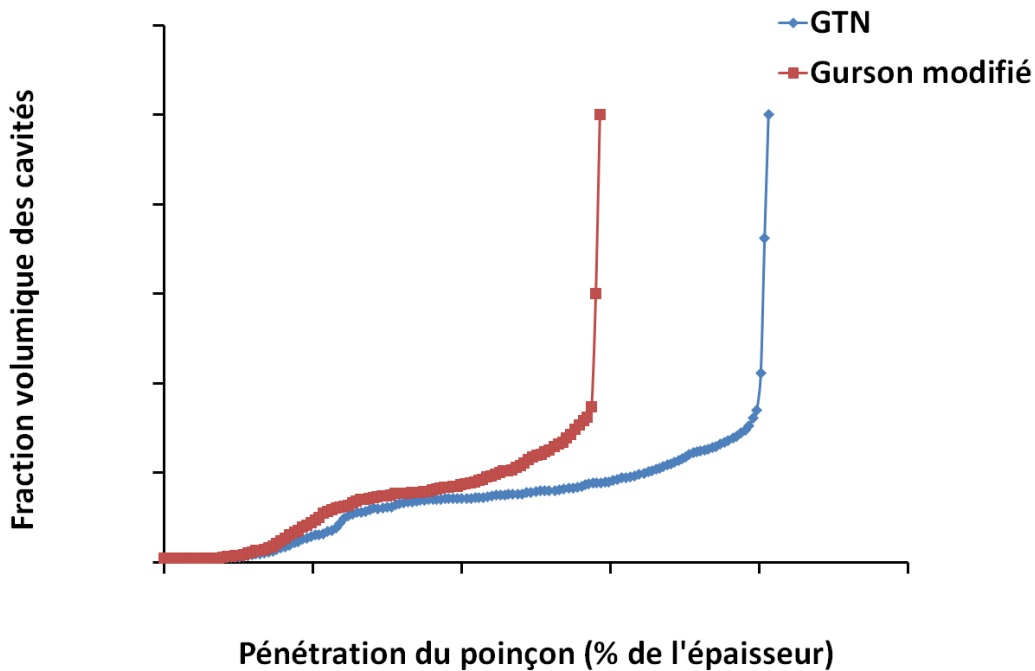


Figure IV-19 : Evolution de la fraction volumique des cavités à l'initiation de rupture pour  $J=13\%$

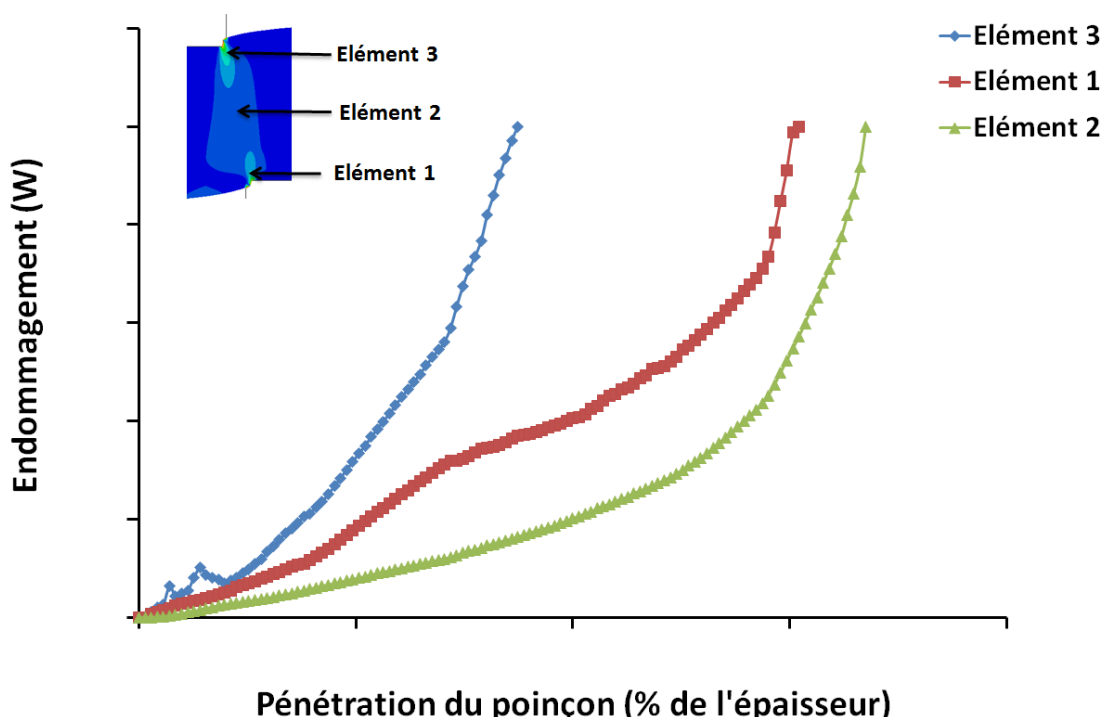


Figure IV-20 : Evolution de l'indicateur d'endommagement W dans trois éléments de la zone de cisaillement obtenue par le critère d'initiation de rupture pour la condition  $J=13\%$

#### IV.4 - Conclusion

Des études expérimentales et numériques du procédé de poinçonnage axisymétrique ont été réalisées dans ce chapitre et permettent d'en tirer les conclusions suivantes :

- Observations micrographiques pour  $J=13\%$  :
  - La formation d'un canal de déformation dans la zone du jeu poinçon-matrice caractérisé par un comportement complètement plastifié ;
  - La localisation de l'endommagement à proximité de l'arête coupante de la matrice, d'où l'amorçage et la propagation de fissure ;
  - Les mécanismes de propagation des fissures sont définis par l'interaction entre les cavités et/ou les micro-fissures. Ces mécanismes affectent localement le chemin de fissuration.
- La déformation plastique et l'érouissage diminuent en allant du bord découpé vers le cœur de la pièce ;
- L'augmentation de la valeur du jeu poinçon-matrice engendre :

- L'augmentation de l'épaisseur de la zone écrouie autour du bord découpé ;
  - La diminution de la zone cisailée ainsi que l'augmentation de la zone arrachée et de l'angle de rupture. Ce qui favorise la présence de défauts géométriques et les risques d'amorçage des fissures ;
  - La diminution des concentrations de contraintes au niveau des arêtes coupantes des outils, et par conséquent une amélioration de leur durée de vie ;
  - La variation des champs de déformation plastique et de la triaxialité de contrainte dans la zone de cisaillement ;
- 
- Les prédictions obtenues par le modèle de Gurson modifié en cisaillement, ont un bon accord avec les résultats expérimentaux par rapport au modèle de GTN classique pour les jeux qui varient de 7% et 13 %, et moins bon de 13% à 17%. Les prédictions pour  $J=31\%$  restent encore très éloignées des résultats expérimentaux ;
  - Le critère d'initiation de rupture prédit bien l'effort maximal de poinçonnage et la pénétration associée à la rupture pour les jeux qui varient de 17% à 31%. Les prédictions du profil découpé par ce critère ne correspondent pas aux observations expérimentales;
  - L'angle de rupture qui est une fonction du jeu poinçon-matrice influence le trajet de propagation de fissure.