

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté du Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique



## Thème

**Optimisation des procédés de mise en forme. Application à l'emboutissage.**

# **Memoire de fin d'études**

*Présenté et soutenu publiquement le 31 octobre 2011*

en vue de l'obtention

du diplôme de *Master Académique en Génie Mécanique*  
option : *Sciences Des Matériaux*

Par

**DERMOUCHE TASSADIT**

Devant le jury composé de :

**FERHOUM  
ALMANSBA  
HACHOUR  
DJIRIDI**

**Rabah  
Madjid  
KAMEL  
RACHID**

**Président  
Directeur de mémoire  
Examineur  
Examineur**

**PROMOTION 2010/2011**

## ***REMERCEMENTS***

*je tient à remercier tons ceux qui ont contribué de Près ou de  
loi, à la réalisation de ce modeste travail.*

*En Premier lieu, je remercie « Dieu » qui m'a donné le  
courage et la Patience Pour accomplir mon travail.*

*En second, je remercie les Personnes qui m'ont épaulé  
Pour la réalisation de ce travail.*

*Toute ma gratitude et mes plus vifs remerciements, vont à  
monsieur **M.ALMANSBA**, pour m'avoir encadré.*

*Je tiens particulièrement à remercier également monsieur  
**M.OULD OUALI**, pour m'avoir initié au code de calcul par  
éléments finis ; **ABAQUS**.*

*Je remercie également tous les **membres du jury**, qui vont  
honorer par leur présence et leur jugement, la soutenance de ce  
Mémoire.*

*Enfin, mes remerciements sont destinés aux étudiants de la  
faculté de  
Génie mécanique pour leurs épaulements et leurs encouragements*

## **DEDICACES**

*Je dédie ce modeste travail à :*

***Ma mère***

*Pour toi ma maman qui a veillé sur moi jour et nuit, toujours  
présente à mes cotés*

*De puis ma naissance et durant toutes les années scolaires, grâce a  
toi, à tes sacrifices que je suis arrivé ici aujourd'hui.*

*Cette réussite elle est dédiée a toi ma chère maman.*

***Mon père***

*Je te dédie ma réussite et je te remercie de m'avoir aidé pour  
arriver*

*à cette hauteur, grâce a tes conseils que mon chemin était clair.*

***Mes sœurs et mes frère***

*je vous dédie mon travail et je  
vous remercie pour votre aide et votre patience.*

***Mon entourage***

*A tous ceux qui m'on aider de prés ou de loin, avec un geste ou un  
mot d'encouragement je leur suis très reconnaissante.*

**TASSADIT**

## *Liste des notations et des symboles*

---

$\varepsilon$  : Déformation totale

$\varepsilon_e$  : Déformation élastique

$\varepsilon_p$  : Déformation élastique

$\vec{n}$  : La normale à la surface

$\sigma$  : Contrainte

$I$  : Tenseur identité

$\dot{\lambda}_{pl}$  : multiplicateur plastique

$\underline{f}$  : Fonction de la surface de charge

$\vec{V}$  : La vitesse

$\sigma_{eq}$  : Contrainte équivalente

$\sigma_0$  : La limite d'écoulement

$P_H$  : Partie hydrostatique de  $\underline{\sigma}$

$X$  : Le tenseur d'écrouissage cinématique

$D_n$  : La variable d'endommagement

$S_D$  : La surface résultant des défauts

$S$  : La surface total à la normale  $\vec{n}$

$\rho$  : La densité du matériau

$V$  : le volume du domaine

$\vec{f}$  : Force volumique

$\vec{t}$  : Forces surfacique

« f » : Fraction volumique des cavités

$f^*$  : La fonction de porosité fictive

$\delta$  : représente l'accélération de la croissance de porosité

$f_c$  : La fraction volumique critique de vides

$f_u^*$  : La valeur ultime de  $f^* = \frac{1}{q_1}$

$f_F$  : La fraction volumique de vides lors de la rupture finale

$V_t$  : Représente à l'instant « t », le volume total de la matrice avec les cavités

$V_C$  : Le volume des cavités

$V_0$  : Le volume de la matrice sans cavités

$\phi$  : Fonction de charge

## *Liste des notations et des symboles*

---

$(U)$  : Le vecteur champ de déplacement

$\vec{U} = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2}$  : Champ d'accélération

$\vec{U} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial t}$  : Champ de vitesse

$\overrightarrow{\delta u}$  : Champ de vitesses virtuelles

$P_e$  : Puissance des efforts extérieurs

$P_i$  : Puissance des efforts intérieurs

$P_a$  : Puissance des efforts d'accélération

$[N_N]$  : La matrice des fonctions d'interpolations du nœud «N» de l'élément «e»

$\{u_e^N\}$  : Le vecteur déplacement du nœud.

$\{\delta u_e\}$  : Le vecteur déplacement virtuel

$\delta \dot{U}^N$  : Le vecteur global des déplacements virtuels cinématiques

$[N_N]$  : La matrice des fonctions d'interpolations du nœud «N» de l'élément «e»

$[M_N^e]$  : La matrice masse cohérente

$[F_{e/int}^N]$  : Le vecteur des efforts intérieurs

$[F_{e/ext}^N]$  : Le vecteur des efforts extérieurs

$[B_N^e] = \frac{\partial N}{\partial X_N}$  : La matrice déformation-déplacement

$\{I_e\}$  : La fonctionnelle élémentaire

$K_T(U_i) = \frac{\partial R(U_i)}{\partial U_i}$  : Matrice tangente du système linéaire

$M$  : Matrice de masse

$\gamma$  : Coefficient de frottement

$\mu$  et  $\lambda$  : Coefficients de lame

$E$  : Le module de Young

$\nu$  : Coefficient de poisson

$R(U)$  : Le résidu global

$\{ \}$  : Vecteur

$[ ]$  : Matrice

$(:)$  : produit doublement contracté

|                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I. 1</b> : Schématisation d'une opération de formage.....                                                                                                                                  | 2  |
| <b>Figure I.2</b> : Le principe de matriçage.....                                                                                                                                                    | 3  |
| <b>Figure I.3</b> : Le principe de l'estampage.....                                                                                                                                                  | 4  |
| <b>Figure I.4</b> : procédé de laminage.....                                                                                                                                                         | 5  |
| <b>Figure I.5</b> : opération d'extrusion.....                                                                                                                                                       | 6  |
| <b>Figure I.6</b> : Pièces obtenues par extrusion.....                                                                                                                                               | 6  |
| <b>Figure I.7</b> : Schématisation d'un outil de découpage de tôles minces.....                                                                                                                      | 7  |
| <b>Figure I.8</b> : Représentation de la forme générale de la courbe effort/ déplacement .....                                                                                                       | 8  |
| <b>Figure I.9</b> : procédé de pliage.....                                                                                                                                                           | 9  |
| <b>Figure I.10</b> : <b>a)</b> Pliage en V ; <b>b)</b> Pliage en l'air.....                                                                                                                          | 9  |
| <b>Figure I.11</b> : <b>a)</b> Pliage en frappe ; <b>b)</b> Pliage en tombé de bord.....                                                                                                             | 9  |
| <b>Figure I.12</b> : Exemples des pièces obtenues par hydroformage.....                                                                                                                              | 10 |
| <b>Figure I.13</b> : Principe du procédé d'hydroformage des tubes .....                                                                                                                              | 11 |
| <b>Figure I.14</b> : Principe d'hydroformage des flans simple.....                                                                                                                                   | 11 |
| <b>Figure I.15</b> : Principaux modes de défaillances (Flambage, Plissement et Rupture) .....                                                                                                        | 12 |
| <b>Figure I.16</b> : procédé d'emboutissage.....                                                                                                                                                     | 13 |
| <b>Figure I-17</b> : Plan schématique d'un outillage d'emboutissage.....                                                                                                                             | 14 |
| <b>Figure I.18</b> : Les différentes phases de l'emboutissage.....                                                                                                                                   | 16 |
| <b>Figure I.19</b> : Pièces obtenues par emboutissage – <b>a)</b> petites pièces – <b>b)</b> pièces de gros volume.....                                                                              | 16 |
| <b>Figure I.20</b> : Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage d'une pièce de révolution.....                                                                                               | 17 |
| <b>Figure I.21</b> : Deux modes principaux de déformation en emboutissage.....                                                                                                                       | 18 |
| <b>Figure I.22</b> : Illustration de différents défauts rencontrés en emboutissage, <b>a)</b> formation de plis, <b>b)</b> défonçage de la pièce, <b>c)</b> formation des cornes d'anisotropie ..... | 19 |
| <b>Figure 1.23</b> . Exemple de déformées obtenues à la fin puis après l'étape d'emboutissage (simulation par éléments finis) d'une géométrie en « Oméga ».....                                      | 20 |
| <b>Figure I.24</b> : le retour élastique après l'emboutissage.....                                                                                                                                   | 21 |
| <b>Figure 1.25</b> . Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas).....                                                                                                            | 22 |
| <b>Figure 1.26</b> . Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible).....                                        | 23 |
| <b>Figure II.1</b> : Représentation de l'écrouissage isotrope .....                                                                                                                                  | 27 |

|                                                                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure II.2 : (1) représentation de l'écrouissage cinématique linéaire de Prager dans le plan des contraintes principales, et en traction/compression uni-axiales(2).....</b> | <b>28</b> |
| <b>Figure II.3 : Faciès de rupture d'un acier.....</b>                                                                                                                           | <b>30</b> |
| <b>Figure II.4 : Germination de l'inclusion par a) rupture b) décohésion inclusion/matrice.....</b>                                                                              | <b>31</b> |
| <b>Figure II.5: Croissance des cavités.....</b>                                                                                                                                  | <b>32</b> |
| <b>Figure II.6: Coalescence des cavités.....</b>                                                                                                                                 | <b>33</b> |
| <b>Figure II.7 : Réponse schématique d'une éprouvette à un essai de traction uniaxiale ([Mariage03]).....</b>                                                                    | <b>34</b> |
| <b>Figure II .8: Coupe d'un élément endommagé.....</b>                                                                                                                           | <b>36</b> |
| <b>Figure III.1 : conditions aux limites.....</b>                                                                                                                                | <b>38</b> |
| <b>Figure III.2 : Discrétisation du domaine C.....</b>                                                                                                                           | <b>39</b> |
| <b>Figure III.3: L'interface d'Abaqus/Cae.....</b>                                                                                                                               | <b>45</b> |
| <b>Figure IV. 1 : courbe expérimentale Contrainte-Déformation pour l'Aluminium [Khe04].....</b>                                                                                  | <b>49</b> |
| <b>Figure IV.2: schématisation de l'élément de volume représentatif (EVR).....</b>                                                                                               | <b>50</b> |
| <b>Figure IV.3 : Superposition de la courbe expérimentale et numérique de la Contrainte-..Déformation.....</b>                                                                   | <b>52</b> |
| <b>Figure IV .4 : Schématisation de l'essai d'emboutissage de Swift.....</b>                                                                                                     | <b>53</b> |
| <b>Figure IV.5 dimensions de l'outillage et du flan.....</b>                                                                                                                     | <b>54</b> |
| <b>Figure VI.6 : représentation des conditions aux limites.....</b>                                                                                                              | <b>55</b> |
| <b>Figure IV.7 : courbe numérique effort du poinçon – déplacement du poinçon.....</b>                                                                                            | <b>56</b> |
| <b>Figure IV.8 : Isovaleurs de la contrainte équivalente et l'endommagement pour certains déplacements du poinçon (Al).....</b>                                                  | <b>57</b> |
| <b>Figure IV.9 : Initiation de la rupture sur l'embouti (Al).....</b>                                                                                                            | <b>58</b> |
| <b>Figure IV.10 : Evolution de la force d'emboutissage en fonction du déplacement du poinçon [khe04].....</b>                                                                    | <b>58</b> |

# Sommaire

## I. Procédés de mise en forme

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction .....                                                   | 1  |
| I.2. procédés de mises en forme.....                                     | 1  |
| I.3 Différents procédés de mise en forme par déformation plastique ..... | 2  |
| I.3.1 travaille des métaux à l'état massif.....                          | 2  |
| I.3.1.1. Matriçage .....                                                 | 2  |
| I.3.1.2. L'estampage.....                                                | 3  |
| I.3.1.3. Laminage .....                                                  | 4  |
| I.3.1.4. L'extrusion .....                                               | 5  |
| I.3.2 travaille des métaux à l'état feuilles.....                        | 7  |
| I.3.2.1. Le découpage.....                                               | 7  |
| I.3.2.2. Le pliage .....                                                 | 8  |
| I.3.2.3 Hydroformage .....                                               | 10 |
| I.3.2.4. Emboutissage .....                                              | 13 |
| 1. définition et principe .....                                          | 13 |
| 2. Les outils.....                                                       | 14 |
| 3. L'emboutissage en température .....                                   | 14 |
| 4. Les différentes phases de l'emboutissage.....                         | 15 |
| 5. Principaux modes de déformation en emboutissage.....                  | 17 |
| 6. Les principaux défauts des pièces embouties .....                     | 18 |
| 7. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage.....             | 23 |
| I.4 Conclusion.....                                                      | 24 |

## II. Comportement élastoplastique couplée à l'endommagement

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction .....                           | 25 |
| II.2.lois de comportement.....                    | 25 |
| II.2.1. lois de comportement élastoplastique..... | 25 |
| II.2.2. Critères de plasticité :.....             | 26 |
| II.2.3. Lois d'écrouissage .....                  | 26 |
| II.3 Endommagement.....                           | 29 |

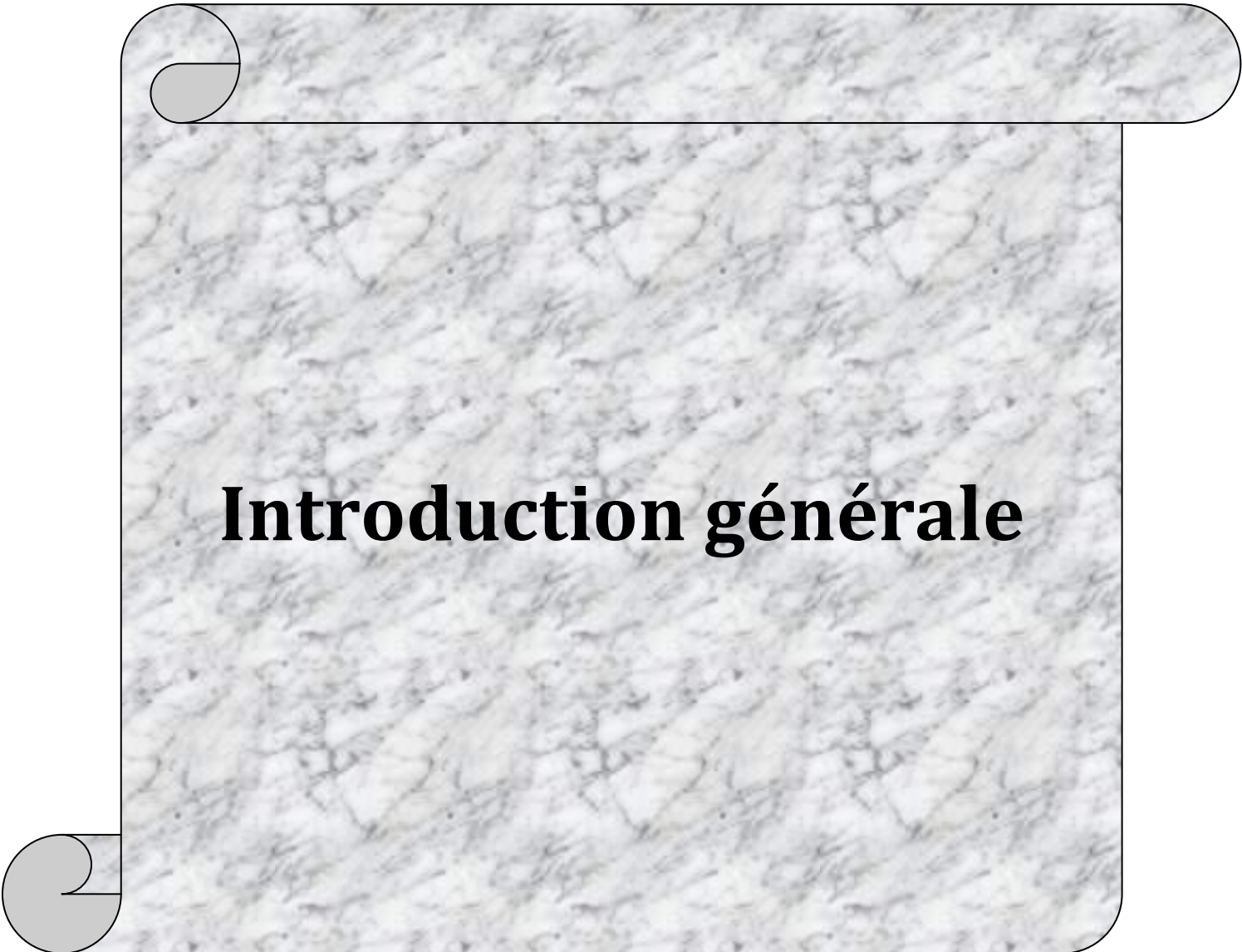
|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| II.3.1.Description de l'endommagement.....                  | 29 |
| II.3.1.1 Endommagement différé .....                        | 29 |
| II.3.1.2 Endommagement instantané .....                     | 29 |
| II.3.1.3 Rupture ductile d'une éprouvette .....             | 33 |
| II.4 Représentations mathématiques du dommage ductile ..... | 34 |
| II.4.1 Définition de la variable d'endommagement .....      | 34 |
| II.4.2 Modélisation de l'endommagement ductile .....        | 35 |
| 1 Le modèle de Gurson .....                                 | 35 |
| II.4 Conclusion .....                                       | 35 |

### **III. Implémentation numérique**

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction.....                                                          | 37 |
| III.2 Implémentation numérique.....                                              | 37 |
| III .2.1 Discrétisation spatiale. Principe des puissances virtuelles (PPV) ..... | 37 |
| III.2.2 Discrétisation spatiale du P.T.V .....                                   | 39 |
| III.3 méthode de résolution .....                                                | 41 |
| III.3.1 Analyse statique implicite ((schéma de Newton-Raphson)) .....            | 41 |
| III.3.2 Analyse dynamique explicite .....                                        | 42 |
| III.4 Présentation du logiciel Abaqus .....                                      | 44 |
| III.4.1 La simulation numérique .....                                            | 44 |
| III.5 Les principaux modules .....                                               | 45 |
| III.6 Conclusion .....                                                           | 48 |

### **VI. Application au procédé de mise en forme par emboutissage simulation numérique**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction .....                                    | 49 |
| IV.2 Test homogène .....                                   | 49 |
| IV.3 Simulation numérique d'emboutissage .....             | 52 |
| IV.3.1 Emboutissage de Swift .....                         | 52 |
| IV.3.2 : Description des conditions de la simulation ..... | 53 |
| IV .3. 3 Les conditions aux limites .....                  | 54 |
| IV.3.4 Le maillage .....                                   | 55 |
| IV.4 Etude de l'évolution de l'effort d'emboutissage ..... | 56 |
| IV. 6 Conclusion.....                                      | 59 |

The background of the slide is a light-colored marbled paper with a pattern of grey and white veins. There are three decorative corner tabs: a small one in the top-left, a larger one in the top-right, and a medium one in the bottom-left. All tabs are filled with a solid grey color.

# **Introduction générale**

# *Introduction générale*

---

La maîtrise du comportement des matériaux pendant leur mise en œuvre et en service est une nécessité dans le monde industriel actuel. Le développement de moyens informatiques de plus en plus performants permet de limiter les études expérimentales coûteuses au profit des modèles numériques. Ces outils numériques permettent à la fois de simuler les procédés de mise en forme industriels et de mieux comprendre les phénomènes intervenant au cours de ces procédés.

Le procédé de déformation plastique par emboutissage de tôles est utilisé sur une grande échelle dans l'industrie. Les principaux utilisateurs sont les secteurs de l'automobile et de l'électrotechnique. L'amélioration de la compétitivité de ces secteurs industriels peut être obtenue grâce à une réduction des coûts de production, en associant le savoir-faire traditionnel avec les capacités de prévisions offertes par la simulation numérique notamment à l'aide de la méthode des éléments finis.

La simulation numérique a fait des progrès considérables durant les vingt dernières années, suite à une grande croissance des capacités des moyens de calcul et stockage de données associées aux interfaces graphiques à la disposition de l'utilisateur de CAO. Grâce à des algorithmes de plus en plus robustes, la méthode des éléments finis peut traiter des problèmes non linéaires issus du comportement du matériau, de la géométrie de la pièce et du contact avec les outils.

Aujourd'hui, plusieurs logiciels de simulation permettent d'optimiser et de modéliser la grande gamme des procédés de mise en forme, tels que le découpage, l'emboutissage, le pliage, etc. parmi ces logiciels on peut citer ABAQUS, FEAP, FORGE 1 et 2, etc.

Dans ce travail, nous avons tenté de faire et de présenter la simulation numérique de procédé d'emboutissage des tôles minces, en utilisant le modèle de Gurçun (GTN), décrit le comportement du matériau lors de sa mise en forme.

Notre travail est reparti en quatre chapitres :

# ***Introduction générale***

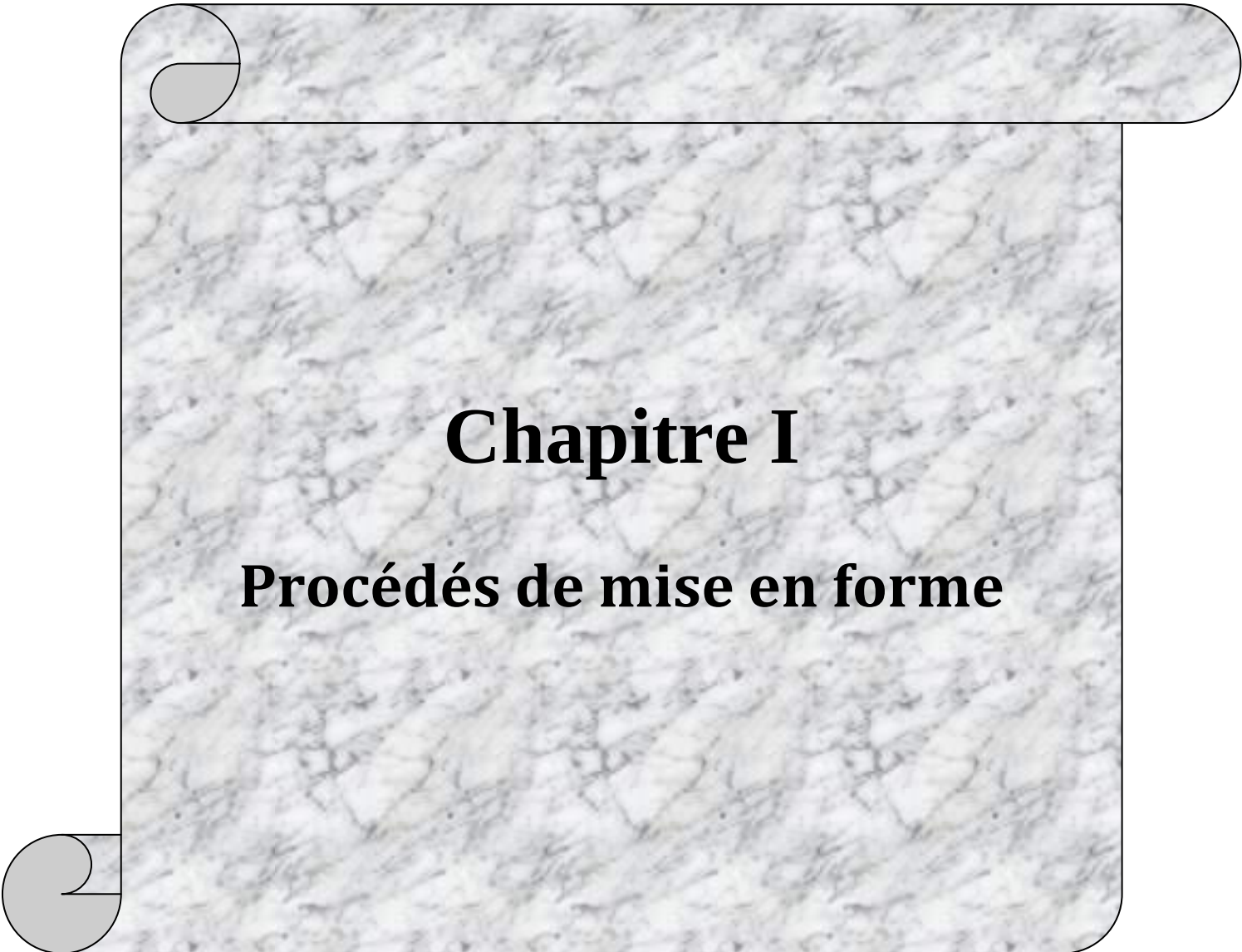
---

Nous avons après l'introduction, le premier chapitre, sera consacré à la présentation des différents procédés de mise en forme, notre attention est focalisée sur l'emboutissage, pour lequel plusieurs détails seront présentés.

Dans le deuxième chapitre, on traitera Comportement élastoplastique couplée à l'endommagement où on présentera le modèle de Gurçon (GTN), qui permet de décrire les principaux phénomènes physiques jouant un rôle dans la mise en forme.

Le chapitre trois, est dédié à la présentation des aspects numériques liés à l'implémentation du modèle élastoplastique couplé à l'endommagement, dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS et présentation de ce dernier.

L'objectif du quatrième chapitre, est de mettre en application notre étude par la simulation numérique du procédé d'emboutissage, avec le modèle de Gurçon (GTN). Une comparaison qualitative et quantitative, entre la simulation numérique et l'expérimentation sera réalisée.

The background of the slide is a light-colored marbled paper with a pattern of grey and white veins. There are four decorative corner tabs: a small grey tab at the top-left, a larger grey tab at the top-right, a small grey tab at the bottom-left, and a larger grey tab at the bottom-right. The text is centered on the slide.

# **Chapitre I**

## **Procédés de mise en forme**

## I.1 Introduction :

La mise en forme des matériaux métalliques, est une opération qui assure la fabrication des pièces, en production de grandes séries à faible coût. Rapportés à la qualité des pièces finales obtenues, les procédés de mise en forme restent la forme la plus économique d'obtention des produits par déformation plastique des métaux. Au cours du formage, les pièces subissent des variations dimensionnelles ou des caractéristiques fonctionnelles qui peuvent affecter d'une manière considérable leur qualité finale.

## I.2 procédés de mises en forme :

Les procédés de mise en forme ayant une incidence directe sur les caractéristiques morphologiques et mécaniques des pièces, il est nécessaire de connaître les principes physiques et technologiques de ceux-ci afin de concevoir efficacement nos produits.

Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques produit. En effet, chaque procédé dépend d'une famille de matériaux et impose ses règles de tracé. De la même manière, les caractéristiques pièces peuvent imposer un procédé.

On peut classer les procédés dans quatre familles suivant la méthode de mise en forme :

### ❖ Par enlèvement de matière ;

On part d'un bloc, et on crée les formes de la pièce en enlevant la matière à l'aide d'un outil

Exemple : usinage...

### ❖ Par ajout de matière ;

On part d'un plateau vide, et on ajoute de la matière pour créer la pièce.

Exemple : dépôt de fil abs.

### ❖ Par transformation (moulage) ;

On coule la matière à l'état liquide ou pâteux dans un moule, et on obtient la pièce après solidification.

Exemple : Injection plastique ...

### ❖ Par déformation.

On part d'un matériau en feuille que l'on déforme à l'aide d'un outillage spécifique.

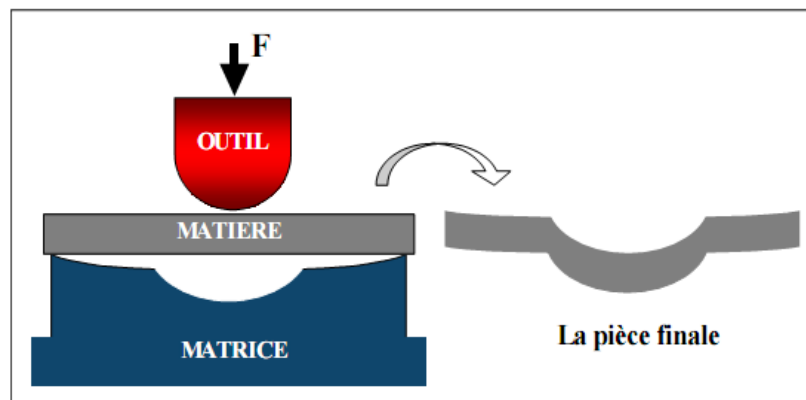
Exemple : emboutissage...

Parmi ces procédés on s'intéresse particulièrement aux procédés de mises en forme par déformation plastique.

### I.3 Différents procédés de mise en forme par déformation plastique :

Le principe de ce procédé est de déformer un matériau à l'aide d'un outillage spécifique. Cette déformation peut se réaliser à chaud ou à froid sur des matériaux plastique ou métallique. Les matériaux métalliques à mettre en forme peuvent se présenter sous la forme de tôle ou de lopin.

Le principe du procédé est d'amener la déformation dans le domaine plastique à l'aide de matrice, de manière à donner à la matière la forme souhaitée.



**Figure I. 1 :** Schématisation d'une opération de formage.

Ce procédé peut être classé en deux grandes catégories :

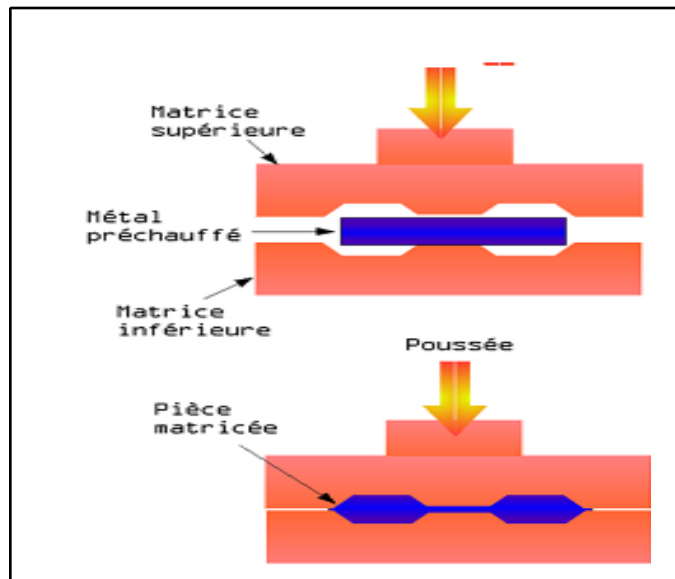
- a) le travail des métaux à l'état massif ; laminage, matriçage, forgeage, étirage, estampage...etc.
- b) le travail des métaux en feuilles : emboutissage, pliage, découpage,...etc.

#### I.3.1 travail des métaux à l'état massif

##### I.3.1.1 Matriçage :

La forge par matriçage consiste donc à former par déformation plastique après chauffage des pièces brutes réalisées en alliages non ferreux tels que les alliages d'aluminium, de cuivre, de titane, de nickel, etc.

Le matriçage est une opération de forge effectuée à l'aide d'outillages appelés des matrices (demi-matrice supérieure et demi-matrice inférieure). Les matrices portent en creux la forme de la pièce.

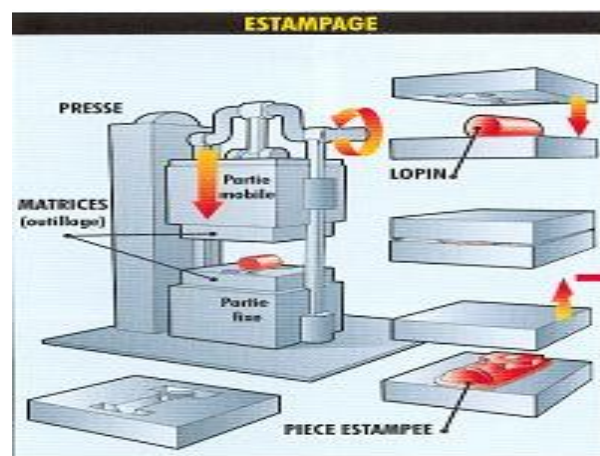


**Figure I.2:** *Le principe de matriçage*

### ***1.3.1.2 L'estampage :***

L'estampage est une opération de forgeage en trois coups (ébauche, finition et bavurage). Cette opération consiste à former, après chauffage, des pièces brutes par pression entre deux outillages nommés matrices, que l'on vient fixer sur des presses (hydrauliques, mécaniques,...).

On commence par faire l'ébauche de la pièce désirée, en plaçant le lopin dans la matrice d'ébauche. Une fois celle-ci prête, on la met dans la matrice ayant la forme de la pièce voulue. Puis, on vient découper les cordons de bavures.



**Figure I.3 :** *Le principe de l'estampage.*

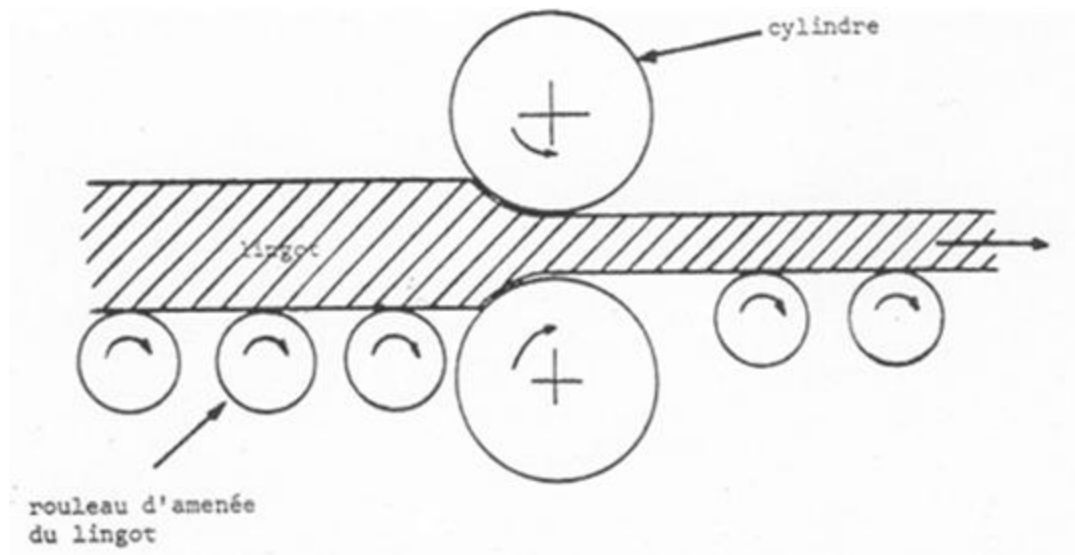
### ***1.3.1.3 Laminage :***

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme le métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier ou les pâtes alimentaires. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés, appelés rouleaux. Il existe aussi des opérations de laminage particulières utilisant plus de deux rouleaux.

Un laminoir est une installation industrielle ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau. Il permet également la production de barres profilées (produits longs).

Il existe de nombreux types de laminoirs :

- ✓ laminoir à produits plats
- ✓ laminoirs industriels pour les métaux
- ✓ laminoir à papier
- ✓ laminoir à verre afin de produire les verres imprimés, colorés ou non, utilisés dans l'aménagement intérieur, les vitrages occultant et la décoration.
- ✓ laminoir à produits longs
- ✓ laminoirs universels (métaux)
- ✓ laminoirs en cannelures (métaux)
- ✓ laminoirs à fils industriels (cuivre par exemple)
- ✓ laminoirs de bijoutiers
- ✓ laminoirs à rouleaux coniques : pour le formage des roues pour le chemin de fer
- ✓ laminoir à pâtes alimentaires : pour toutes les nouilles plates y compris les lasagnes
- ✓ laminoir de boulangerie/pâtisserie : pour les pâtes à tartes, la pâte feuilletée et à croissants.



**Figure I.4 :** procédé de laminage

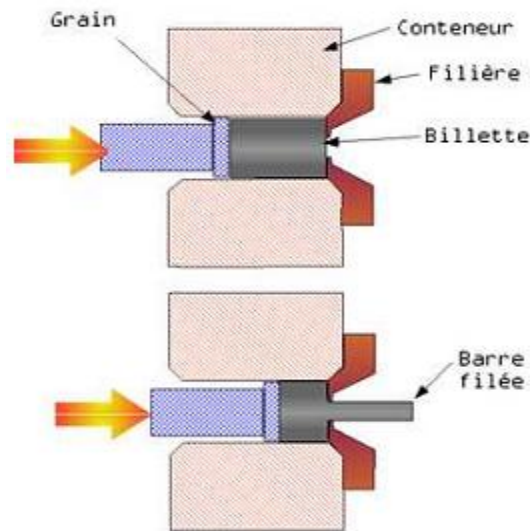
### ***I.3.1.3 L'extrusion :***

L'extrusion est un procédé de fabrication avec lequel un matériau compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. On forme en continu un produit long (tube, tuyau, profilé, fibre textile) et plat (plaque, feuille, film).

Il ne faut pas confondre ce procédé avec le tréfilage qui consiste aussi à faire passer un matériau au travers d'une filière, mais sous l'effet d'une traction. Ce procédé est conduit à froid.

L'extrusion donne des pièces aux formes encore plus précises que celles qui sont réalisées avec l'estampage ou le matriçage. De plus, les pièces présentent des états de surface excellents, ce qui permet souvent de les utiliser sans usinage complémentaire.

L'extrusion s'applique à divers produits tels les métaux, les matières plastiques, les caoutchoucs, les matériaux composites, mais aussi l'argile pour la fabrication des briques alvéolaires, les pâtes alimentaires.

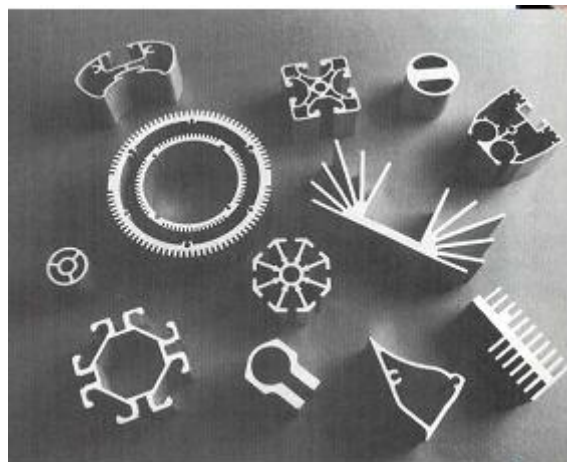


**Figure I.5:** opération d'extrusion

❖ **Les pièces obtenues par extrusion :**

Les pièces obtenues par extrusion à l'aide des presses mécaniques de grandes dimensions, sont des pièces identiques à sections égales qui ont un très bon état de surface permettant souvent de les utiliser sans usinage complémentaire. Leurs domaines d'application sont très variés tels que : pétrochimie, sidérurgie et métallurgie, mécanique, énergie hydraulique, énergie nucléaire, marine, armement, aéronautique et autres. Le procédé d'extrusion est une opération de formage, qui présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- une cadence élevée de production,
- une économie de matière par rapport au forgeage à chaud ou l'usinage avec une perte de 5 et 20 %,
- l'obtention de tolérances précises.



**Figure I.6:** Pièces obtenues par extrusion.

## I.3.2 Travail des métaux en feuilles

### I.3.2.1 Le découpage :

L'opération de découpage consiste à enlever de la matière par cisaillement. La matière à découper disponible sous forme de tôle (appelée généralement flan, bande, etc.) est maintenue dans l'outil de découpage par la matrice et le serre flan. La séparation de la matière est assurée grâce aux parties coupantes de l'outil de découpage : la matrice et le poinçon. Dans la configuration la plus utilisée pour ce type de procédés, l'outil de découpage présenté schématiquement par la figure 1.7 est composé de trois blocs principaux :

- Bloc poinçon :** Il porte le poinçon dont le contour extérieur correspond à la forme à découper. Il est animé d'un mouvement de translation vertical alternatif via le coulisseau d'une presse afin de permettre la pénétration du poinçon dans la matière puis sa remontée.
- Bloc matrice :** Il contient l'empreinte à découper. L'écrasement de la matière découpée entre l'arête coupante de l'empreinte et celle du poinçon permet de concentrer l'effort exercé sur la zone séparant le rayon de la matrice et le rayon du poinçon. Le bloc matrice permet également de positionner la bande pendant le découpage.
- Bloc serre-flan ou revêtisseur :** Il est généralement lié au bloc poinçon par des ressorts, il assure le maintien de la bande pendant la découpe. Dans de nombreuses applications, le serre flan sert aussi à dévêtir le poinçon de la bande.

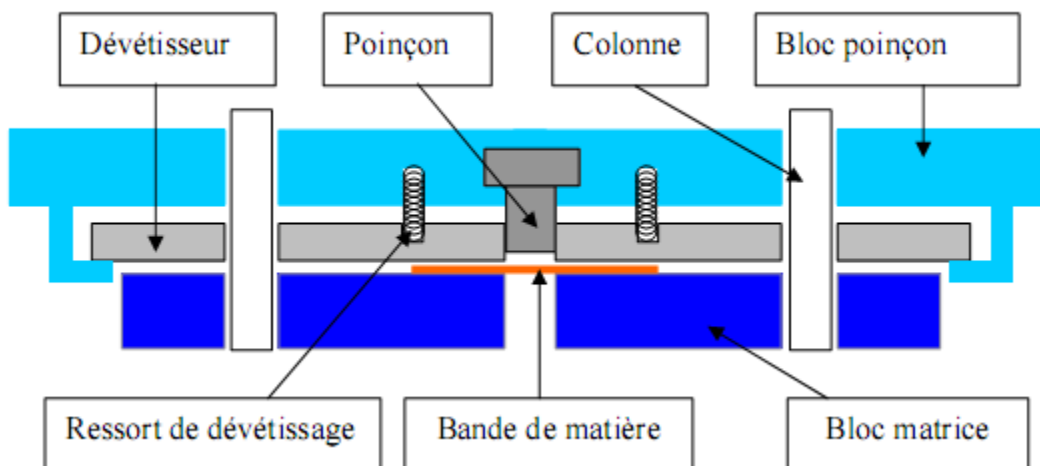


Figure I.7 : Schématisation d'un outil de découpage de tôles minces.

Définition des phases principales de la courbe effort-déplacement du procédé de découpage (Voir figure I.8).

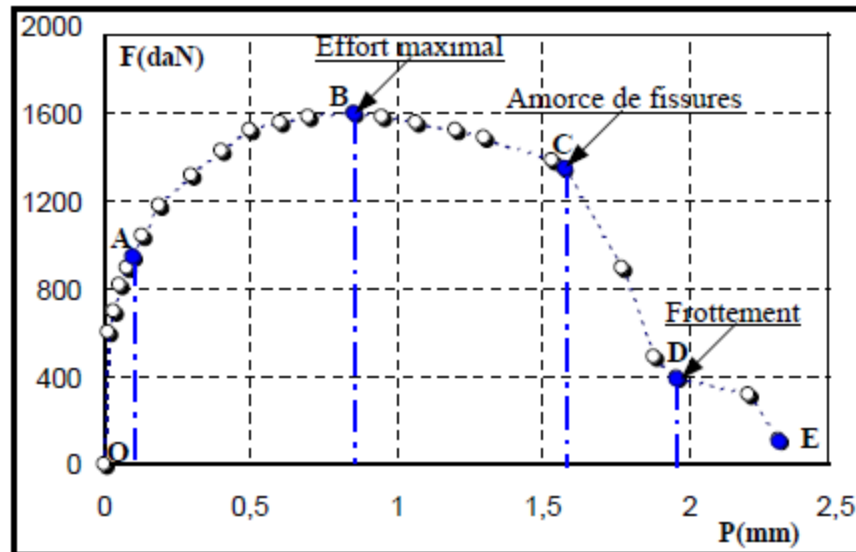


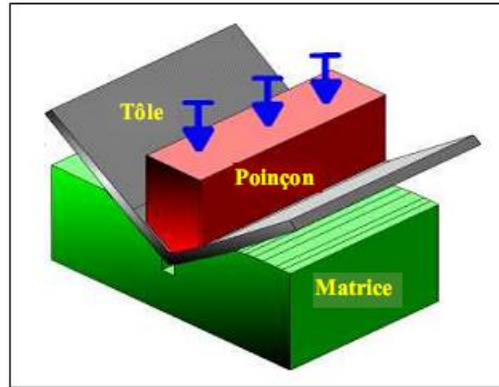
Figure I.8: Courbe effort-pénétration lors d'une opération de découpage [Mai91].

1. Phase 1 : Déformation élastique de la tôle et apparition d'une déformation plastique localisée autour des arêtes des outils coupants.
2. Phase 2 : Formation d'une bande de cisaillement plastique.
3. Phase 3 : Réduction de l'épaisseur de la bande cisailée et endommagement du matériau.
4. Phase 4 : Apparition et propagation des fissures, réduction rapide de la section cisailée et par conséquent la chute de l'effort.
5. Phase 5 : Expulsion de la partie découpée, elle nécessite de vaincre les frottements accentués par le retour élastique

### I.3.2.2 Le pliage :

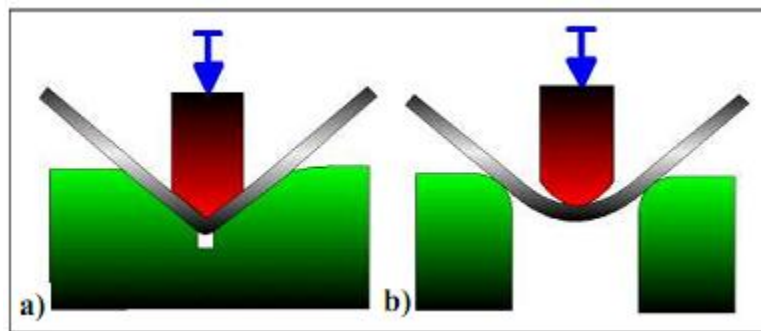
#### a) Définition et Principe :

Le pliage est une opération de mise en forme par déformation permanente de tôles. Cette opération est effectuée à froid, elle consiste à donner la forme désirée à des tôles planes dont l'épaisseur dépasse rarement 5mm. Pour atteindre la déformation plastique du matériau il faut que les contraintes dépassent la limite élastique pour que la déformation reste permanente.

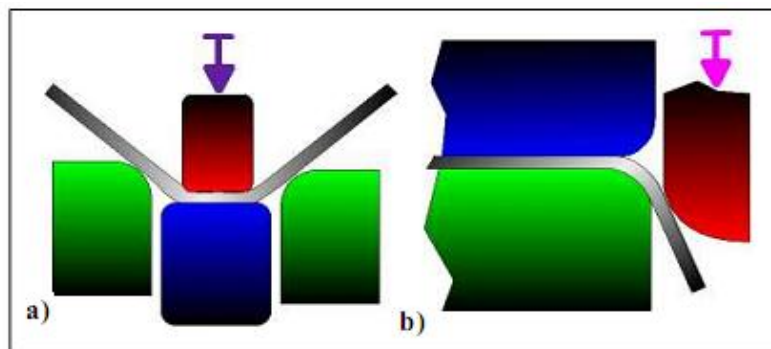


**Figure I.9 :** *procédé de pliage*

Il existe plusieurs types de pliage tels que : le pliage en V, le pliage en l'air, le pliage en tombé de bord ou en L, le pliage en U, etc. (figures I.10, I.11).



**Figure I.10 :** a) *Pliage en V* ; b) *Pliage en l'air*.



**Figure I.11 :** a) *Pliage en frappe* ; b) *Pliage en tombé de bord*.

### I.3.2.3 Hydroformage :

L'hydroformage est un procédé de mise en forme, actuellement très utilisé puisqu'il présente plusieurs

avantages par rapport à d'autres procédés. Cette technique de mise en forme utilise la pression d'un fluide pour mettre en forme la tôle. Donc par rapport au procédé d'emboutissage par exemple le liquide peut jouer le rôle du poinçon ou de la matrice. Cette technologie trouve, aujourd'hui, de plus en plus d'applications pour les pièces automobiles telles que les longerons, les collecteurs d'échappement, les berceaux support moteur, ... (figure I.12).



**Figure I.12 :** Exemples des pièces obtenues par hydroformage.

On distingue principalement trois procédés d'hydroformage :

### **1. L'hydroformage des tubes :**

Un effort de compression généré par deux vérins, est généralement appliqué sur les deux extrémités du tube permettant ainsi un apport de matière à la zone déformée (figure1.13). Cet apport a pour effet décompenser l'amincissement du tube et d'améliorer sa formabilité [Ben2005].

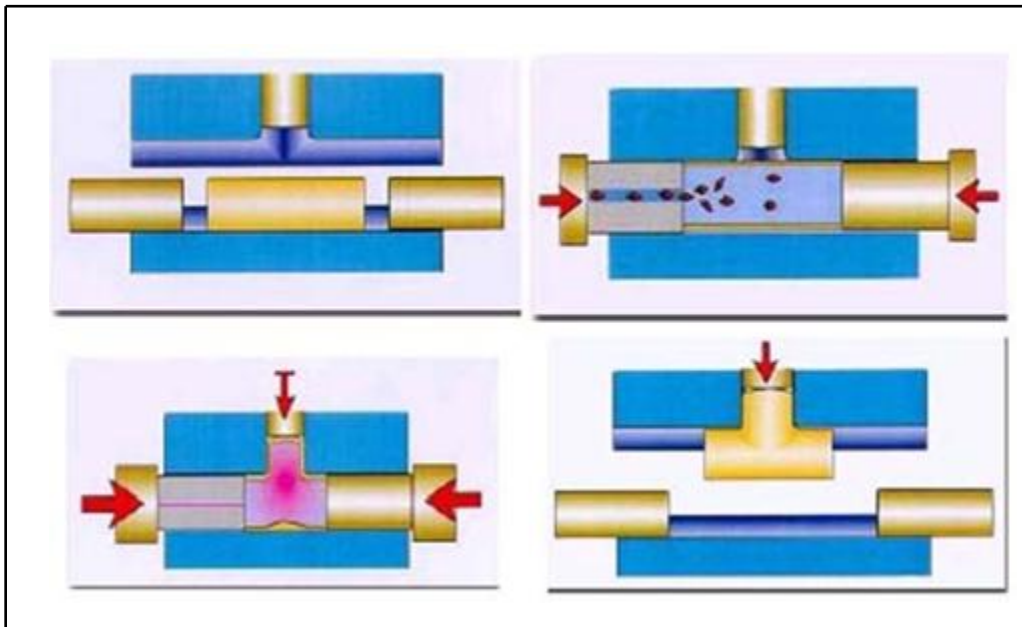


Figure I.13 : Principe du procédé d'hydroformage des tubes

## 2. L'hydroformage de flan simple :

Il consiste à appliquer une pression sur une tôle pouvant se gonfler suivant la forme de la matrice. Ainsi la tôle est formée contre une matrice qui lui donne la forme finale [Ben2005]. La tôle peut être aussi formée sous l'action conjuguée d'un poinçon en déplacement et d'un liquide sous pression (figure1.14).

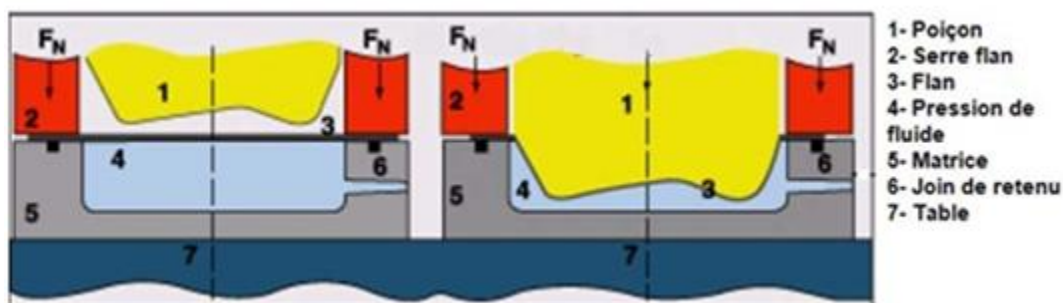


Figure I.14: Principe d'hydroformage des flans simple

## 3. L'hydroformage de flans doubles :

Au cours de ce procédé, deux plaques sont formées simultanément à l'intérieur d'une même matrice comportant une partie supérieure et une partie inférieure. Ce procédé a l'avantage de fournir deux pièces simultanément.

### ❖ Les avantages et les inconvénients de l'hydroformage:

L'hydroformage offre plusieurs avantages [Ben2005]:

- La mise en forme des pièces de forme complexes avec une bonne reproductibilité et une précision dimensionnelle
- Plus léger (Moins de joints de soudure, Moins de pièces),
- Grande rigidité (utilisation de matériaux moins épais),
- Qualité de pièce améliorée.

La distribution uniforme de la déformation peut amener :

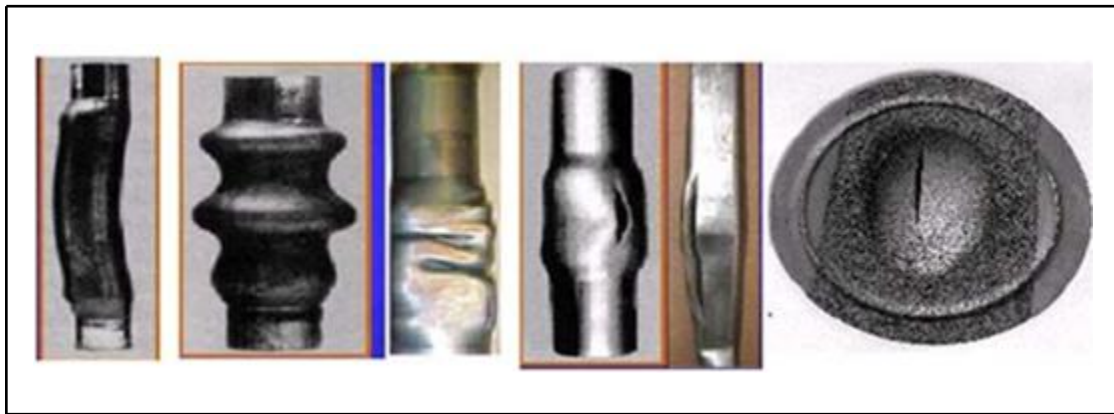
- Moins de retour élastique,
- Moins de distorsion des surfaces,
- Meilleure tolérance des dimensions extérieures,
- Pas de frottement entre outils et tôle.

En dépit des avantages cités ci-dessus, l'hydroformage présente certaines limitations aussi bien d'ordre technologique qu'économique :

- Procédé lent et cadence de production peu élevée,
- Nécessite des matrices de haute qualité,
- Les matrices rugueuses peuvent causer l'amincissement des parois et la rupture des pièces.

Les principaux problèmes dans ce procédé que les chercheurs tentent d'éviter ou les minimiser sont :

- ❖ Striction
- ❖ Rupture
- ❖ Plissement



**Figure I.15:** Principaux modes de défaillances (Flambage, Plissement et Rupture)

#### **I.3.2.4 Emboutissage :**

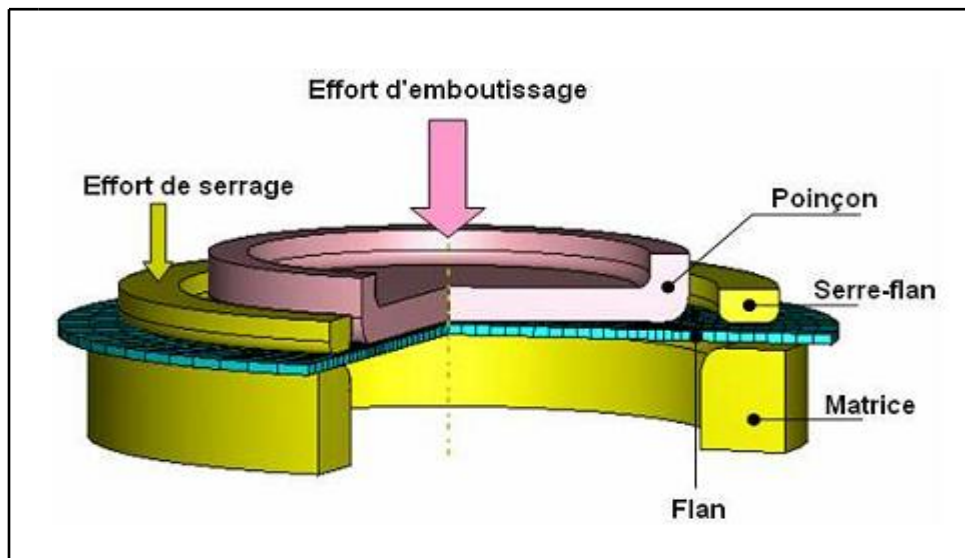
##### **1. définition et principe :**

Emboutir : " Travailler une plaque de métal au marteau et sur une enclume, de manière à la rendre concave d'un coté et convexe de l'autre " [Mer1998].

Par cette définition, nous sommes à même d'imaginer qu'il y'a fort longtemps qu'on emboutit des tôles. L'emboutissage consiste alors à fabriquer, à partir d'un flan plan de faible épaisseur, une pièce de forme complexe généralement non développable (Figure I.16). Le flan étant plaqué contre la matrice avec une certaine force par l'intermédiaire d'un serre-flan, et mis en forme par avancée du poinçon à l'aide d'une presse.

Le processus d'emboutissage se décompose de la manière suivante :

- Définition de la direction de l'emboutissage,
- Définition du contour et de la position du flan initial,
- Descente du serre-flan pour plaquer la tôle sur la matrice,
- Mise en forme de la tôle par avancée du poinçon,
- Découpage des habillages de l'embouti afin d'obtenir la pièce finale

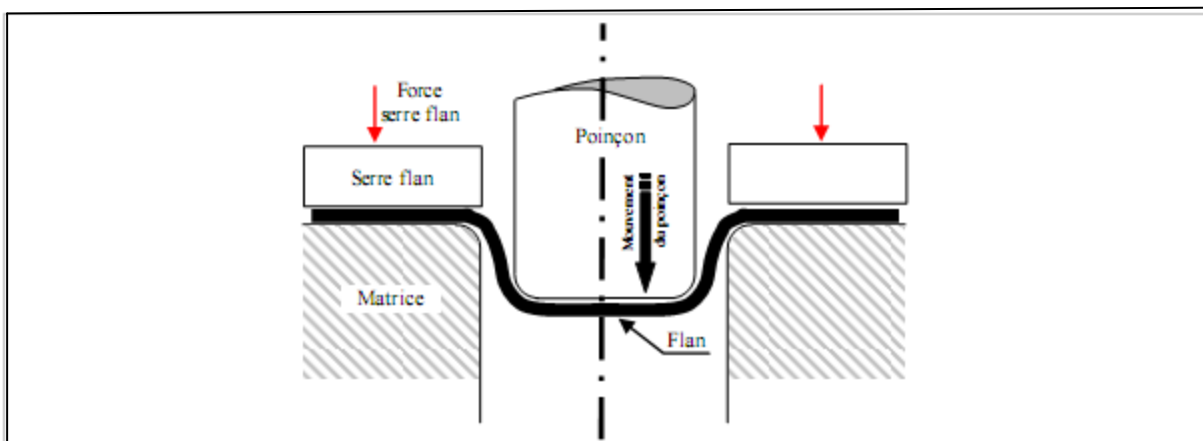


**Figure I.16 :** *procédé d'emboutissage*

## 2. Les outils :

L'emboutissage se pratique à l'aide de presses à emboutir de forte puissance munies d'outillages spéciaux qui comportent généralement trois pièces :

- Une matrice, en creux, épouse la forme extérieure de la pièce ;
- Un poinçon, en relief, épouse sa forme intérieure en réservant l'épaisseur de la tôle ;
- Un serre flan entoure le poinçon, s'applique contre le pourtour de la matrice et sert à coincer la tôle pendant l'application du poinçon.



**Figure I-17 :** *Plan schématique d'un outillage d'emboutissage.*

**Propriétés nécessaires pour matériaux des outils :**

-  Avoir une dureté assez élevée à chaud que le matériau à usiner, plus une bonne résistance à l'usure à l'abrasion et à la déformation;
-  Avoir une ténacité suffisante (rupture et chocs);
-  être chimiquement inerte par rapport au matériau de la pièce;
-  Avoir une bonne stabilité chimique (résistance à l'oxydation et à la dissolution);
-  Avoir une bonne conductibilité thermique ainsi qu'une bonne résistance aux chocs thermiques.

**3. L'emboutissage en température :*****a) L'emboutissage à froid :***

Cette technique consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée sur un outillage double effet mais peut aussi l'être sur un outillage simple effet dans le cas où les emboutis sont peu profonds ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage.

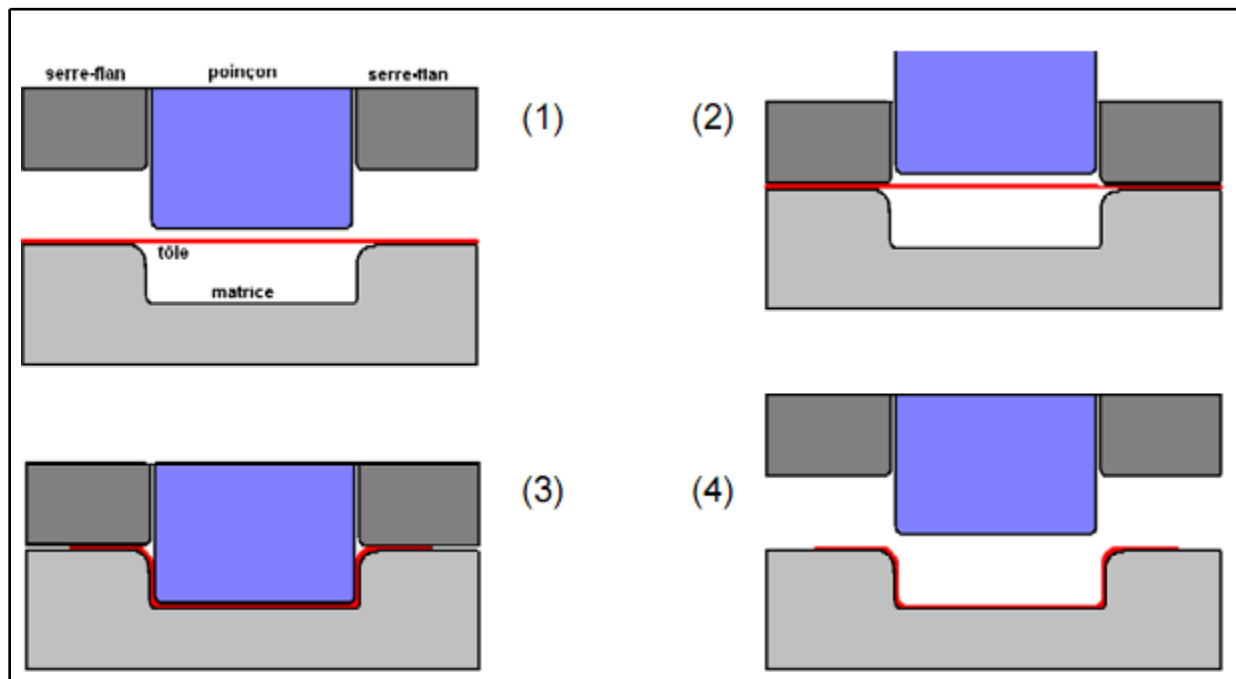
Ce type de formage permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde. Néanmoins, l'épaisseur des tôles à emboutir ainsi que les caractéristiques mécaniques sont à l'origine des limitations de cette technique. En effet, il devient nécessaire pour les grandes épaisseurs d'effectuer l'emboutissage en plusieurs passes. A ceci, il faut ajouter d'une part l'effet de l'écrouissage apparaissant lors de la mise en forme et se traduisant par un durcissement structural et une baisse de la ductilité. D'autre part, la création de contraintes résiduelles au sein de la pièce finie en limite ses applications (risque de rupture fatigue).

***b) L'emboutissage à chaud :***

Principalement utilisé sur presses hydrauliques simple ou double effet, le formage de fonds de réservoir en acier est le plus important domaine d'application. Cette technique facilite la déformation du matériau, permet l'emboutissage de pièces profondes par chauffage du flan (et de la matrice) et évite l'écrouissage et la formation de contraintes résiduelles. Les cadences de production de l'emboutissage à chaud sont moins élevées que celles de l'emboutissage à froid du fait de l'inertie de chauffage. De plus les pièces finies sont de moins bonne qualité, que ce soit au niveau de l'état de surface ou du dimensionnement. Enfin, cette technique nécessite des mises au point de la sécurité plus importantes.

**4. Les différentes phases de l'emboutissage:**

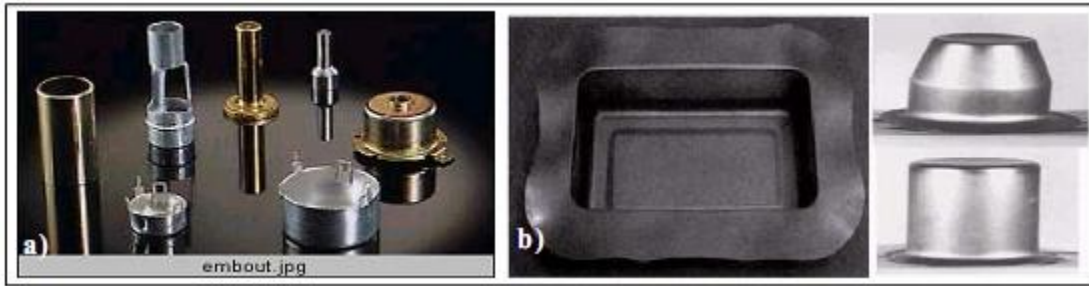
- Phase 1** : poinçon et serre flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.
- Phase 2** : le serre flan est descendue et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de fluer.
- Phase 3** : le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique en l'appliquant contre le fond de la matrice.
- Phase 4** : le poinçon et le serre flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).
- Phase 5** : on procède au « détournage » de la pièce, c'est-à-dire à l'élimination des parties devenues inutiles (essentiellement les parties saisies par le serre flan).



**Figure I.18** : Les différentes phases de l'emboutissage

L'emboutissage sous presse présente de nombreux intérêts, tant par son aspect économique, que qualitatif. Cette technique de mise en forme, permet d'obtenir des pièces à des prix bas avec des cadences de production très élevées. Les applications de cette opération de mise en forme, sont extrêmement larges. On les trouve notamment dans les domaines suivants : transports (automobile pièces extérieures -carrosserie

et intérieures - renforts), électroménager (radiateurs, machines à laver), ménager (casseroles), sanitaire (lavabos métalliques), emballage (boîte de boisson, conserves), etc.

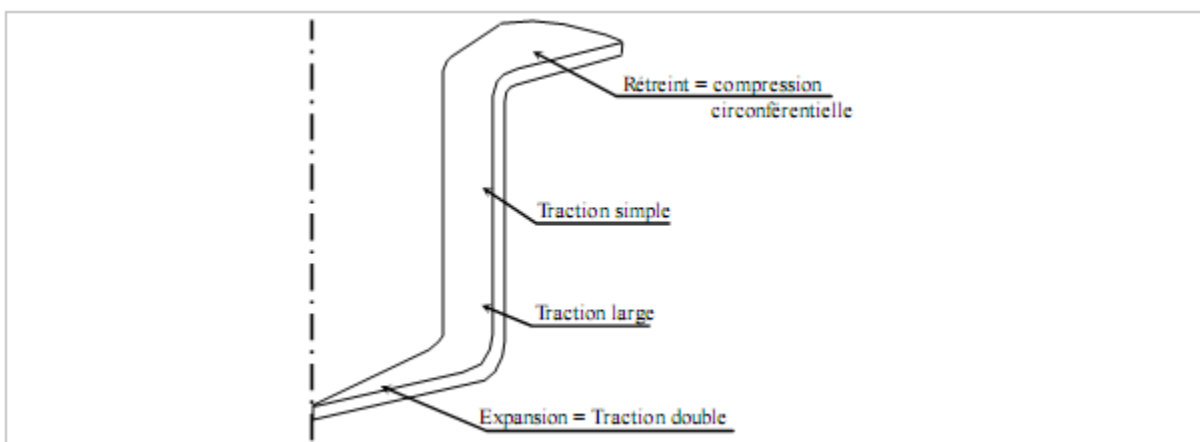


**Figure I.19 :** *Pièces obtenues par emboutissage – a) petites pièces – b) pièces de gros volume.*

### 5. Principaux modes de déformation en emboutissage:

L'emboutissage impose à la tôle divers modes de déformation, les deux modes principaux étant : le rétreint et l'expansion.

Il existe une infinité d'autres modes dépendant principalement de l'importance du glissement de la tôle sous le serre flan. Par exemple, dans le cas de l'emboutissage d'une pièce cylindrique à fond plat, illustrée par la (figure I.20) on voit apparaître l'expansion et le rétreint ainsi que l'évolution de différents modes de déformation le long de la pièce emboutie.



**Figure I.20 :** *Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage d'une pièce de révolution. [Del02]*

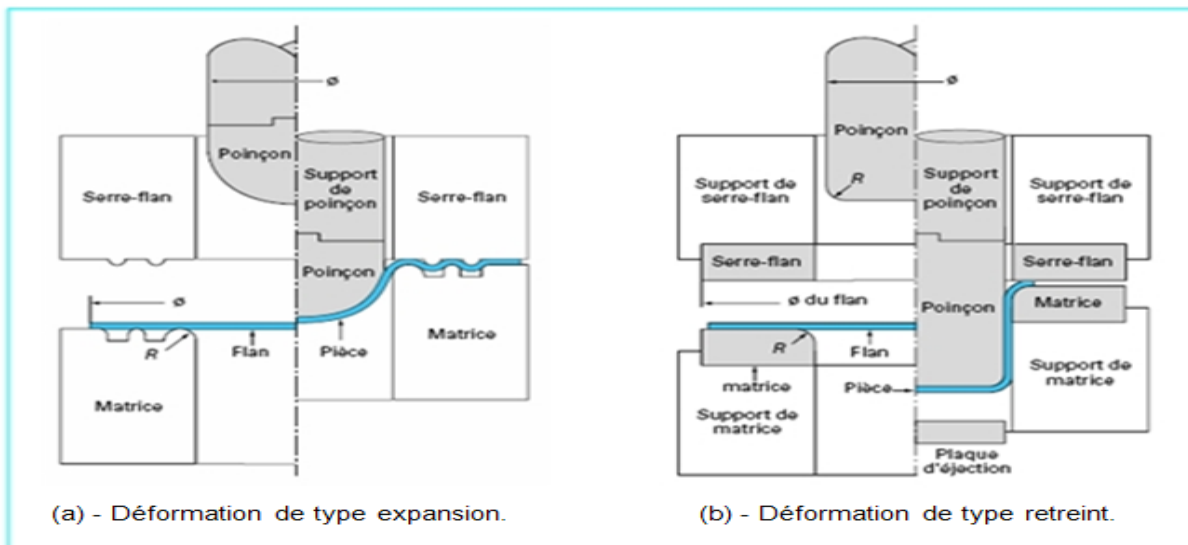
- **Le mode en expansion :**

Suivant lequel le flan est bloqué entre le serre-flan et la matrice (Figure. I. 21 (a)),

○ **Le mode en rétreint :**

Suivant lequel le métal est amené à glisser entre la matrice et le serre-flan de manière à réaliser la partie droite ou jupe de l'embouti. (Figure I.21 (b))

L'emboutissage consiste en fait à réaliser le meilleur compromis possible entre les déformations des deux types en jouant sur les divers paramètres qui contrôlent l'écoulement du métal dans l'outil (tels que le nombre de passes d'emboutissage, la géométrie des outils ou l'état de surface). Entre ces deux modes, il existe des cas intermédiaires où le frottement freine le glissement sur tout ou partie de la surface de l'embouti.



**Figure I.21:** Deux modes principaux de déformation en emboutissage [Cun00]

## 6. Les principaux défauts des pièces embouties :

Les défauts rencontrés sur les pièces embouties sont soit des défauts structuraux et géométriques soit des défauts d'aspect (rugosité).

A titre d'exemple, nous pouvons citer les défauts dus au retour élastique de la pièce lorsqu'elle est retirée de l'outillage. Cela se manifeste par des déflexions de certaines zones de la pièce.

Lorsque la pièce est déformée de manière trop importante, on voit apparaître des phénomènes d'augmentation de la rugosité de la surface de la pièce. On parle alors de peau d'orange. Ces types de défaut engendrent des rebuts par exemple dans le cas de pièces qui sont, à posteriori, peintes comme pour des

éléments de carrosserie.

Des phénomènes de plissement apparaissent lorsque la pression de serre flan n'est pas suffisante.

Des défauts structurels tels que les déchirures de pièces sont dus à des trop forts amincissements localisés de la pièce. On parle alors de défonçage (figure I-22-b)). La progression ou les conditions de fabrication sont alors à redéfinir.

Enfin, l'anisotropie du matériau engendre la formation de cornes dues notamment à des propriétés du matériau qui ne sont pas homogènes selon les directions de déformation (figure I-22-c)).

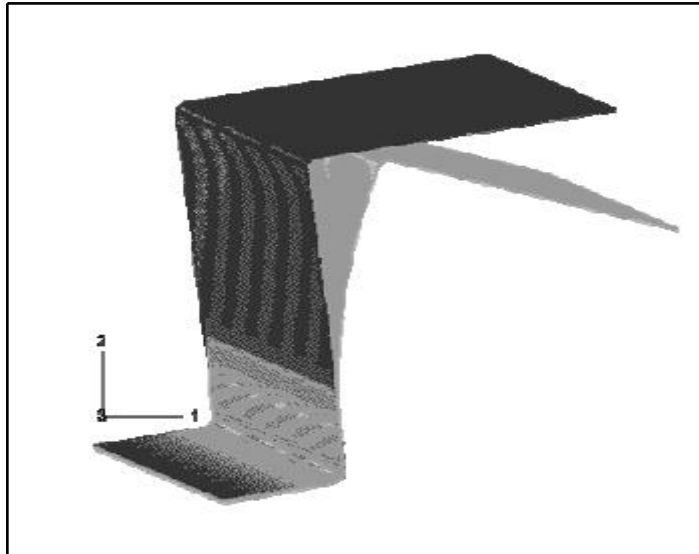


**Figure I.22 :** Illustration de différents défauts rencontrés en emboutissage, **a)** formation de plis, **b)** défonçage de la pièce, **c)** formation des cornes d'anisotropie.

#### **a) Le retour élastique :**

##### **❖ Présentation du retour élastique :**

Lors de la mise en forme d'une tôle métallique par emboutissage, la forme recherchée est celle définie par le profil des outils à la fin de l'étape d'emboutissage. Cependant, après extraction de la pièce, à cause du comportement élastique du matériau, elle se relâche et la forme de la pièce évolue vers un nouvel état d'équilibre jusqu'à relaxation des contraintes. La Figure 1.23 montre un exemple d'une déformée obtenue juste à la fin de l'étape d'emboutissage puis après enlèvement des outils. Elle illustre clairement la différence entre les deux déformées.

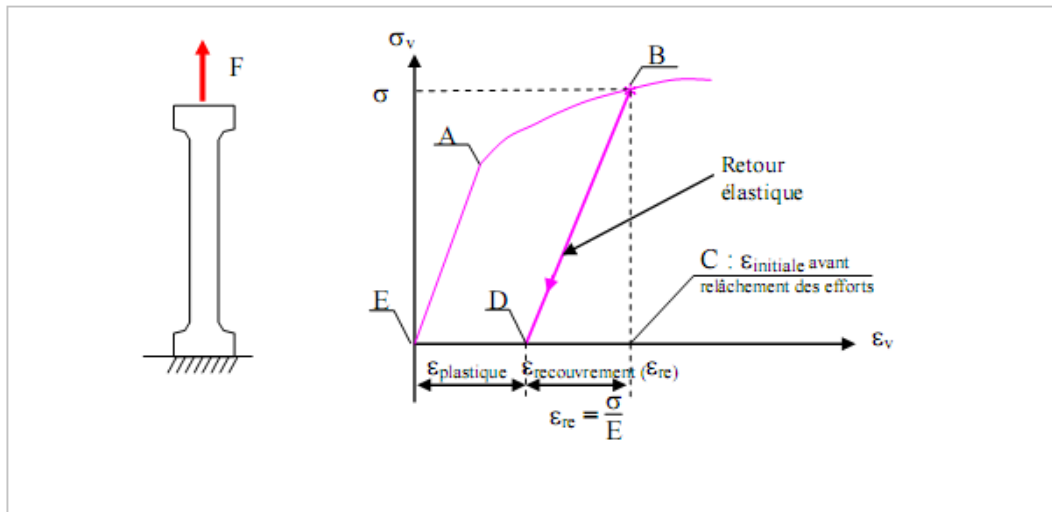


**Figure 1.23.** Exemple de déformées obtenues à la fin puis après l'étape d'emboutissage (simulation par éléments finis) d'une géométrie en « Oméga ». [Had06].

#### ❖ Origine du retour élastique :

Lorsque les efforts qui ont généré une déformation plastique du métal sont supprimés, on voit apparaître une légère déformation. Ce phénomène s'appelle le retour élastique, on parle aussi de recouvrement élastique. Ceci peut être facilement montré sur la courbe de contrainte-déformation obtenue à partir d'une éprouvette de traction (figure I.24).

En emboutissage, le flan est déformé afin d'atteindre un état de contrainte supérieur à la limite d'élasticité du matériau (point A). La déformation contient alors deux composantes : La déformation élastique qui sera récupérée après déchargement, La déformation plastique qui correspond à la déformation permanente du métal. Sur la (figure I.24) la déformation élastique est représentée par la zone C-D et la déformation plastique par D-E.



**Figure I.24 :** le retour élastique après l'emboutissage

### c) Striction :

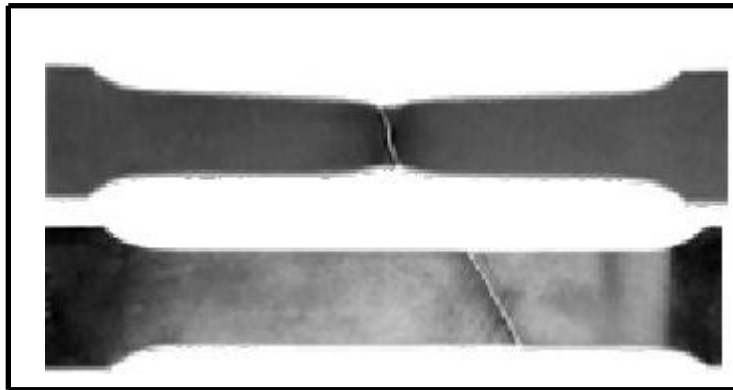
Le phénomène de striction en mise en forme des tôles métalliques pose un problème délicat pour l'industrie, du fait qu'il limite le domaine de formabilité de la tôle. La faisabilité de la pièce par grandes déformations plastiques dépend de l'aptitude de la tôle à se déformer d'une manière quasi-homogène. Cette striction est caractérisée par la diminution de l'épaisseur de la tôle.

Deux types de striction peuvent être définis : diffuse et localisée.

✚ **La striction diffuse :** est caractérisée par une large zone de concentration des déformations.

✚ **La striction localisée:** est caractérisée par une concentration des déformations dans des zones étroites principalement sous forme de bandes.

La Figure 1.25 montre la différence en termes de striction entre une tôle épaisse et une tôle mince lors d'un essai de traction uniaxiale. Sur la tôle épaisse, nous remarquons une réduction de la largeur de l'éprouvette par rétreint avant rupture, signe de striction diffuse avant localisation. Par contre, sur la tôle mince la déformation est concentrée principalement dans une bande étroite où l'épaisseur diminue jusqu'à rupture ; la striction diffuse y est peu perceptible.



**Figure 1.25.** *Striction sur une tôle épaisse (en haut) et très mince (en bas).* [Col 06].

**c) Plissement :**

Les tôles métalliques, vues leurs caractéristiques dimensionnelles (rapport très faible entre l'épaisseur et les dimensions de la tôle dans son plan), sont très sensibles au flambement. Ceci se traduit au cours de la déformation de la tôle par la formation de plis. Ce phénomène est dû aux contraintes de compression qui se développent au cours de la mise en forme et qui agissent dans le plan de la tôle comme des efforts de flambement.

Comme le montre la Figure 1.26, lors de l'opération d'emboutissage d'un godet, ce phénomène peut se manifester au voisinage du bord de la tôle. Il est d'autant plus prononcé que l'effort de serrage est faible. De plus, ces contraintes de compression sont d'autant plus grandes que le diamètre initial du flan est grand par rapport au diamètre du poinçon.

L'augmentation de l'effort de serrage génère des efforts normaux au plan de la tôle qui tendent à éliminer ce phénomène (photo de gauche). Néanmoins, cette solution n'est pas sans risque, car elle empêche l'écoulement de la matière et peut conduire à une rupture prématurée de l'embouti. Une solution complémentaire consiste à diminuer le frottement entre les outils et la tôle, tout en augmentant cet effort de serrage.



**Figure 1.26.** Rupture sans formation de plis (à gauche : effort de serrage élevé) et avec formation de plis (à droite : effort de serrage faible). [Lan 04].

## 8. Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage :

### a) Les avantages

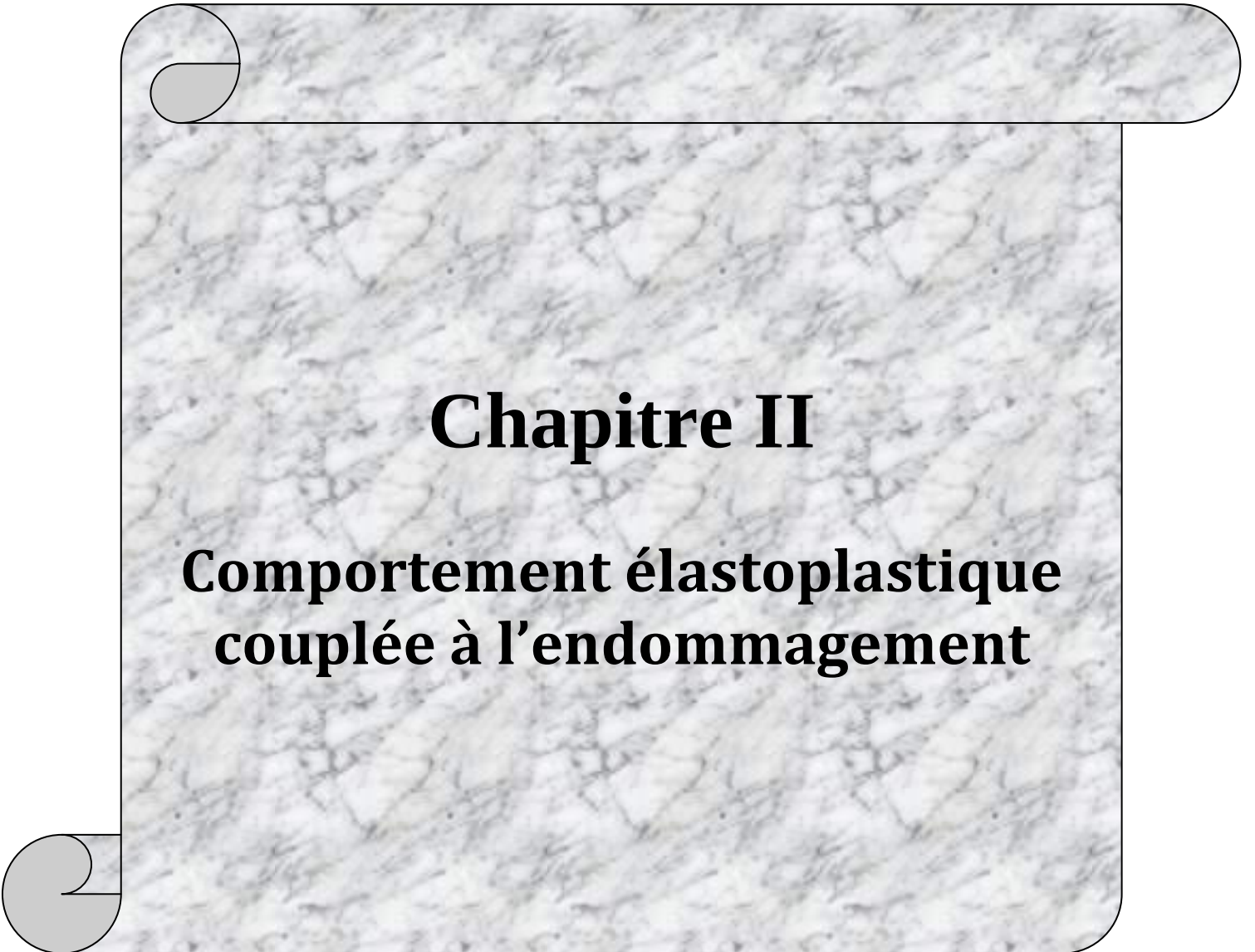
- ✚ L'emboutissage est un procédé permettant d'obtenir des pièces de surface non développable à partir de feuilles de tôle mince. C'est à dire qu'il est possible d'obtenir des formes très variées impossible à obtenir avec un tour ou une fraiseuse.
- ✚ L'état surface d'une pièce brute d'emboutissage est nettement meilleur que celui d'une pièce coulée. L'esthétique des pièces embouties en est donc bien supérieure et les travaux de finition tel que le polissage sont moins lourds à gérer et surtout moins coûteux.
- ✚ Cette technique de mise en œuvre offre un bas prix de revient et permet des cadences de production très élevées :
  - ✚ 100 à 200 pièces par heure pour des pièces de gros volumes (carrosserie automobile)
  - ✚ 3000 à 4000 pièces par heure pour des petites pièces (renfort, capuchon de réservoir).

**b) Les inconvénients :**

-  Les zones d'étirement subissent un amincissement (qui doit rester limité pour éviter la rupture) et les zones de rétreint (compression) subissent une combinaison d'épaississement et de plissement.
-  Le retour élastique, lorsque le poinçon se retire après la phase de mise en forme, la pièce ainsi formée n'est plus soumise à la force de maintien. Il se produit alors un retrait de la matière. Afin d'atténuer ce phénomène, il est courant de recourir à certains artifices tels que la frappe du rayon, l'étirage en fin de gamme ou le maintien prolongé du poinçon.
-  L'entrée de la matrice doit être très arrondie et polie pour éviter toute déchirure du métal et pour optimiser le comportement des zones de retreint.
-  Pour obtenir des pièces précises il est nécessaire d'utiliser des logiciels permettant de simuler les retours élastiques de la pièce.
-  Le temps de préparation est important.
-  la mise au point des outils, poinçon, et matrice est très coûteuse et nécessitant un savoir faire de l'entreprise.

**I.4. Conclusion :**

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons classé les différents procédés de mise en forme. Nous avons d'abord cité les principaux procédés d'obtention des pièces par déformation des métaux à l'état massif comme l'estompage, laminage... . En suite par déformation en feuilles comme le pliage, le découpage et l'emboutissage ...



# **Chapitre II**

## **Comportement élastoplastique couplée à l'endommagement**

## II.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré pour des rappels sur les lois de comportement élastoplastiques, ainsi qu'une brève description des micromécanismes responsables de l'endommagement ductile. Enfin on présente le modèle GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman) (élastoplastique couplée à l'endommagement).

## II.2.lois de comportement :

### II.2.1. lois de comportement élastoplastique :

Le comportement des tôles métalliques, mises en forme par déformation plastique (emboutissage), a fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs décennies. Des modèles de comportement intégrant divers phénomènes physiques, liés aux déformations irréversibles que subit la tôle, ont été développés.

L'étude du comportement de ces tôles est le plus souvent abordée dans le cadre d'une approche élastoplastique pour la plupart des procédés de mise en forme.

- **Séparation des contributions élastiques et plastiques :**

Le comportement élastoplastique repose sur une décomposition de la déformation totale apparente en une partie élastique réversible et une partie plastique irréversible. Lorsque la partie élastique est suffisamment faible, il est courant d'adopter une décomposition additive du tenseur taux des déformations :

$$\underline{\dot{\epsilon}} = \underline{\dot{\epsilon}}_e + \underline{\dot{\epsilon}}_p \quad \text{II 1}$$

Où

$\underline{\dot{\epsilon}}_e$  et  $\underline{\dot{\epsilon}}_p$  désignent respectivement le tenseur des vitesses de déformation élastique et plastique.

Le tenseur taux des déformations total  $\underline{\dot{\epsilon}}$  correspond, dans l'hypothèse des petites déformations, à la partie symétrique du tenseur gradient du champ de vitesse  $V$  qui s'écrit :

$$\underline{\dot{\epsilon}} = \frac{1}{2} [\text{grad}(V) + \text{grad}^T(V)] \quad \text{II 2}$$

L'élasticité traduit une déformation réversible du matériau. Le plus souvent, elle est considérée comme linéaire et isotrope dans le cas des aciers à froid. Dans ces conditions, le tenseur des contraintes de Cauchy  $\sigma$  est relié au tenseur taux de déformations élastiques par la loi de Hooke :

$$\underline{\dot{\sigma}} = \frac{E}{1+\nu} [\underline{\dot{\epsilon}}_e + \frac{\nu}{1-2\nu} \text{trace}(\underline{\dot{\epsilon}}_p) \mathbf{I}] \quad \text{II 3}$$

$\mathbf{I}$  est le tenseur identité,  $\mu$  et  $\lambda$  sont les coefficients de Lamé déduits à partir des coefficients de Poisson  $\nu$  et du module d'Young  $E$  par les relations suivantes:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ et } \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{II 4}$$

### II.2.2. Critères de plasticité :

Il existe une grande variété de critères de plasticité qui visent à modéliser le plus fidèlement possible le comportement des tôles. Ces derniers peuvent être répertoriés en deux familles: les critères isotropes, et les critères anisotropes.

#### ➤ Critère isotrope de Von-Mises :

L'un des critères de plasticité isotrope les plus utilisés pour les matériaux métalliques ductiles est le critère de Von Mises. Il est établi en considérant l'écoulement plastique comme insensible à la pression hydrostatique, il est défini dans un repère de contrainte orthonormé quelconque. Les expressions développées du critère de Von Mises sont :

- dans l'espace des contraintes à 6 composantes :

$$\underline{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)]} \quad \text{II 5}$$

- dans l'espace des contraintes principales à 3 composantes

$$\underline{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2]} \quad \text{II 6}$$

### II.2.3. Lois d'écrouissage :

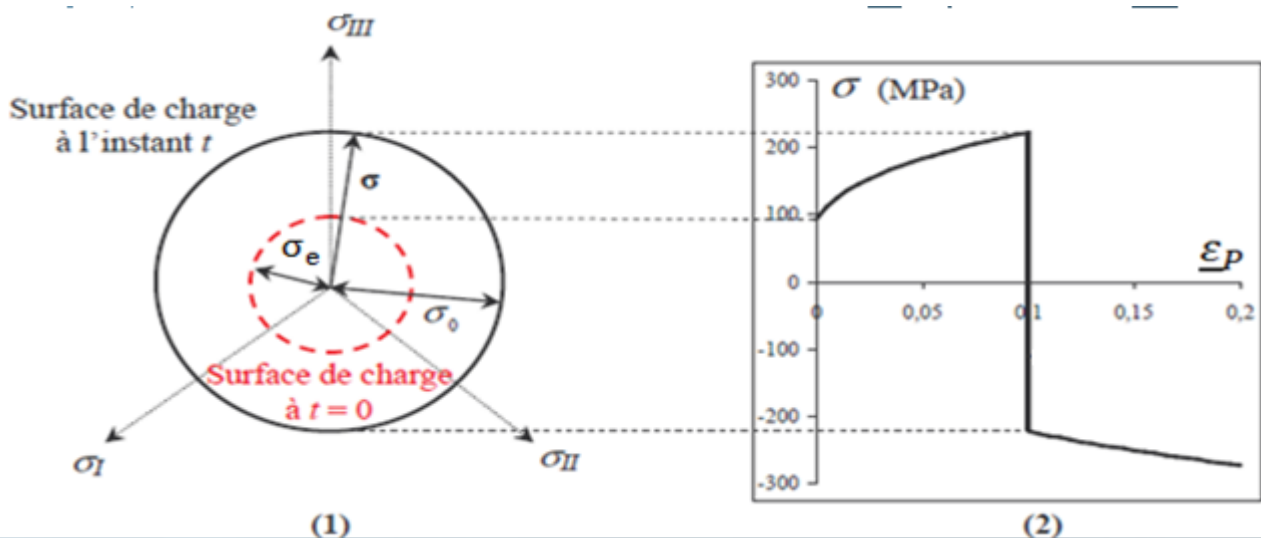
L'écrouissage d'un métal correspond aux modifications qu'il subit lorsque les contraintes qui lui sont appliquées sont suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques, permanentes. Ces modifications sont d'ordre métallurgique (modification de la structure interne du métal) et ont généralement une influence sur ses propriétés mécaniques.

➤ **Ecrouissage isotrope :**

La surface de charge ne dépend pas du tenseur d'écrouissage cinématique  $X$ , l'équation générale de la surface de charge pour le critère d'écoulement isotrope en élastoplasticité s'exprime par

$$\begin{cases} \phi = \bar{\sigma}(\sigma) - \sigma_0(\bar{\varepsilon}_p; \bar{\dot{\varepsilon}}_p) \\ \sigma(\bar{\varepsilon}_p = 0; \bar{\dot{\varepsilon}}_p = 0) = \sigma_e \end{cases} \quad \text{II.7}$$

Nous avons évoqué jusqu'à ici la forme des surfaces de charge au travers des critères de plasticité. Toutefois, tout au long du chargement, ces surfaces évoluent : c'est l'écrouissage plastique. Lorsque la forme de la surface est gardée inchangée et que seule sa taille évolue, l'écrouissage est dit isotrope et est décrit par une courbe d'écrouissage. L'évolution de la surface de charge au cours du temps se traduit géométriquement par une dilatation isotrope de la surface d'écoulement initiale dans l'espace des contraintes. Cette dilatation est directement gérée par la limite d'écoulement  $\sigma$ , fonction de la déformation plastique équivalente cumulée et de la vitesse de déformation plastique équivalente.



**Figure II.1 :** Représentation de l'écrouissage isotrope.

Cette loi s'obtient à partir d'essais de traction ou d'autre essais pour identifier le comportement en grandes déformations comme le cisaillement, la torsion, les essais de gonflage, etc. La figure II.1 montre une représentation de l'évolution de la surface de charge dans le repère des contraintes principales dans le cas de l'écoulement isotrope.

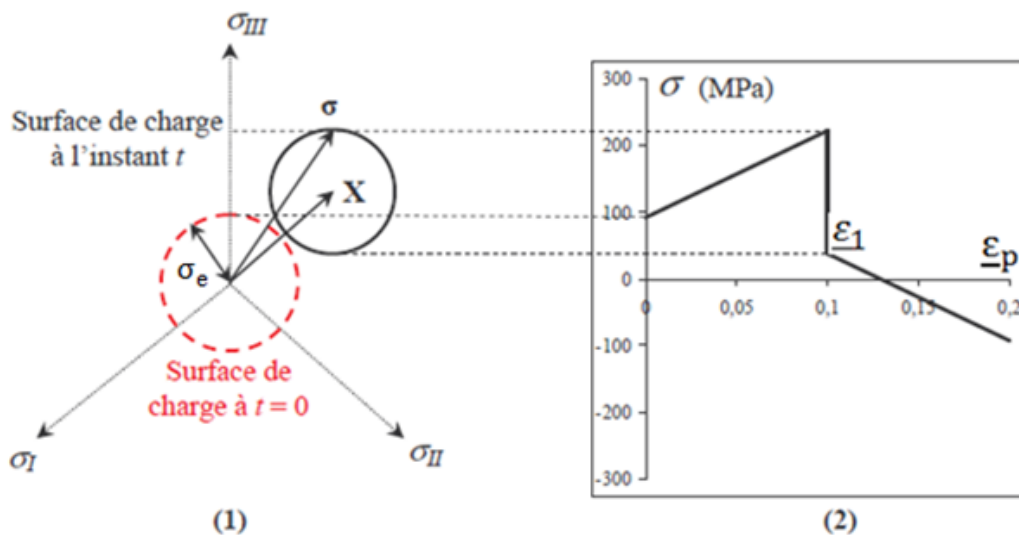
➤ **Ecrouissage cinématique :**

L'équation générale de la surface de charge relative au critère d'écoulement cinématique fait intervenir le tenseur d'écrouissage cinématique  $X$ , elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\phi = (\underline{\sigma} - X) - \sigma_e \quad \text{II 8}$$

La contrainte limite d'écoulement reste constante et égal à la limite  $\sigma_e$ . Cette condition empêche la dilatation de la surface de charge assimilée à un corps rigide dont le centre se déplace dans l'espace des contraintes. Il est donc nécessaire de connaître la loi d'évolution du tenseur d'écrouissage cinématique pilotant le déplacement du centre de la surface de charge au cours du temps. Pour cela, différents modèles d'écrouissage cinématique existent.

L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, est nécessairement linéaire. La figure (II.2) représente la transformation géométrique de la surface de charge, dans le repère des contraintes principales, pour le cas particulier du critère de plasticité de von Mises. Si l'effet Bauschinger est qualitativement représenté par ce modèle, sa quantification n'est pas correcte, puisque le retour à la compression pour des déformations supérieures à  $(\epsilon_1)$ , impose une contrainte nécessairement négative, or le graphe(2) de la figure, montre le contraire. Cependant, ce modèle est de base pour la formulation de l'écrouissage cinématique.



**Figure II.2 :** (1) représentation de l'écrouissage cinématique linéaire de Prager dans le plan des contraintes principales, et en traction/compression uni-axiales(2)

## **II.3 Endommagement:**

### **II.3.1.Description de l'endommagement:**

Il existe différents types d'endommagement. Dans le cas d'emboutissage, nous nous intéresserons uniquement à l'endommagement ductile qui accompagne les grandes déformations plastiques des métaux aux températures ambiantes ou peu élevées.

Lors de la mise en forme, la déformation plastique du matériau s'accompagne d'une évolution progressive de sa microstructure. L'endommagement ductile correspond alors à la formation de microcavités qui vont croître puis coalescer, conduisant ainsi à la rupture ductile du matériau. Selon la composition microstructurale, on peut observer deux grandes familles d'endommagement, à savoir l'endommagement différé et l'endommagement instantané:

#### **II.3.1.1 Endommagement différé :**

L'endommagement différé peut être décomposé en deux parties :

- Sous sollicitations cycliques, la déformation se concentre dans les bandes de glissement, ce qui fait apparaître des extrusions en surface. On parle alors d'endommagement par fatigue.
- A haute température par effet de fluage il y a apparition de cavités qui engendrent une rupture inter-granulaire.

#### **II.3.1.2 Endommagement instantané :**

Ici on se place dans le cadre des chargements monotones, les propriétés mécaniques des matériaux sont affaiblies localement ou globalement par des mécanismes physiques d'endommagement. L'endommagement instantané peut être décomposé en deux parties

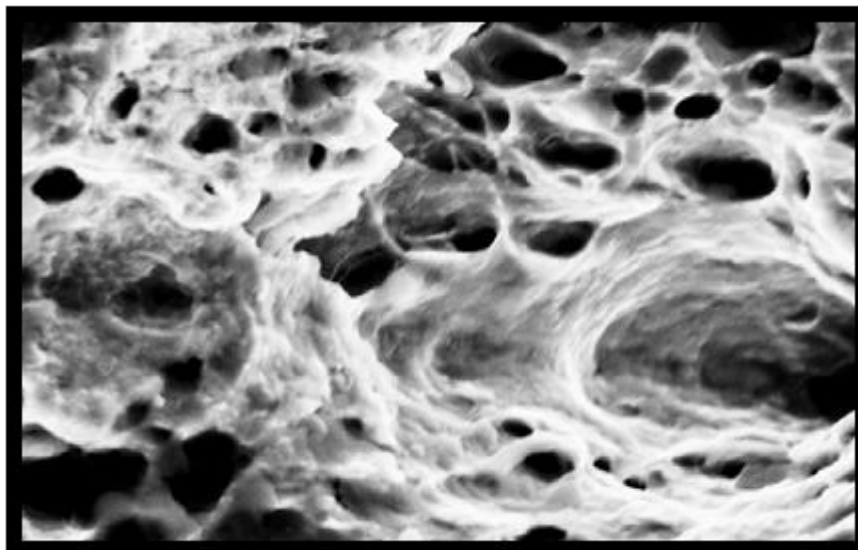
- **Endommagement fragile :**

La rupture dite « fragile » est caractérisée par des ruptures de liaisons interatomiques, les microdéfauts se propageant brutalement sans déformations plastiques appréciables. Le dommage passe brusquement dans ce cas de la valeur zéro à sa valeur critique de rupture finale d'une manière quasi instantanée.

- **Endommagement ductile :**

Dans le cas d'emboutissage, nous nous intéresserons uniquement à l'endommagement ductile qui accompagne les grandes déformations plastiques des métaux aux températures ambiantes ou aux températures élevées.

Lors de la mise en forme, la déformation plastique du matériau s'accompagne d'une évolution progressive de sa microstructure. L'endommagement ductile correspond alors à la formation de microcavités qui vont croître puis coalescer, conduisant ainsi à la rupture ductile du matériau.



**Figure II.3 :** *Faciès de rupture d'un acier*

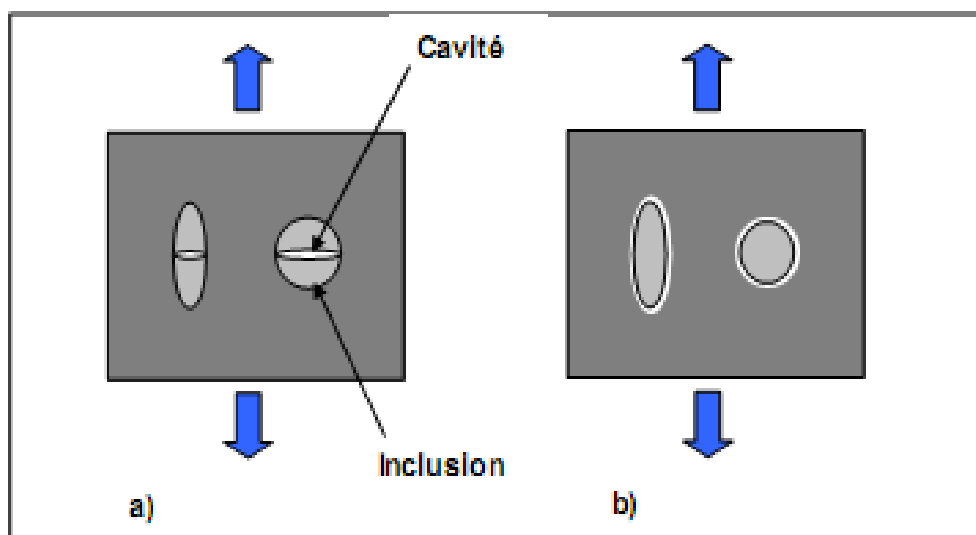
Sur cette image on observe clairement la formation de cavités autour des inclusions

### **1. Les principaux mécanismes physiques de l'endommagement ductile :**

Au cours de grandes déformations plastiques, le processus de dégradation progressive d'un matériau d'un état sain jusqu'à la rupture macroscopique peut être divisé en trois phénomènes distincts : la germination de microcavités, puis la croissance et la coalescence de celles-ci. Ces phénomènes peuvent être décrits comme suit :

#### **a) Germination des cavités :**

La germination correspond à la création de cavités au cours du processus de déformation plastique. Les métaux sont constitués d'une matrice élastoplastique et de particules de seconde phase (inclusions, précipités) considérées comme quasi-rigides. Ce sont ces inclusions (sulfures, oxydes pour les aciers) qui sont à l'origine de la germination. Lorsqu'il n'y a pas de sollicitation, ces particules sont solidaires de la matrice mais il existe tout de même une concentration de contraintes à l'interface matrice/inclusion. Une sollicitation mécanique, même faible, peut alors entraîner une décohésion (Figure II.4b) des inclusions dans la matrice ou même une rupture (Figure II.4a) de celles-ci.

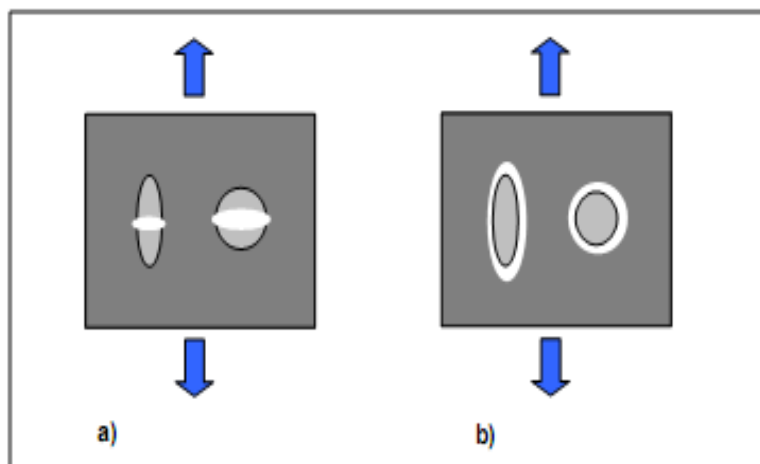


**Figure 11.4 :** Germination de l'inclusion par a) rupture b) décohésion inclusion/matrice

Le vide ainsi créé est appelé cavité. Cependant durant ce stade de germination, les cavités créées sont tellement petites qu'elles n'affectent pas encore le comportement macroscopique du matériau. D'un point de vue mécanique, les propriétés élastiques et plastiques seront considérées comme inchangées.

#### **b) Croissance des cavités :**

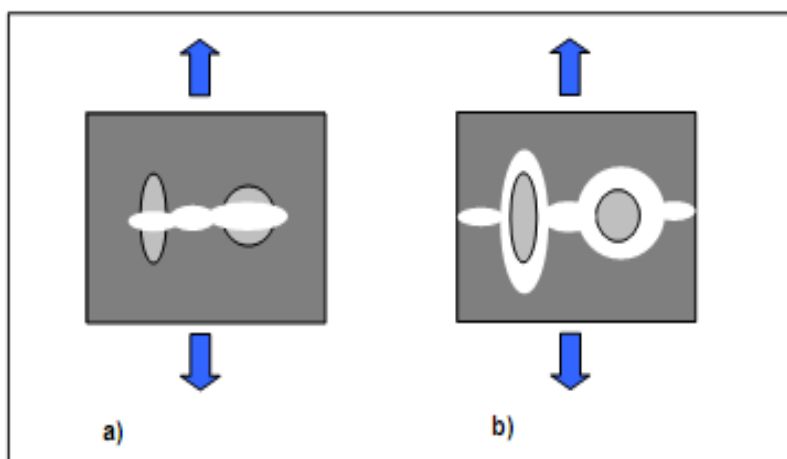
Le mécanisme de croissance est certainement celui qui a le plus été étudié expérimentalement dans le passé et pour lequel de nombreux modèles ont été développés pour le décrire. Durant ce mécanisme, les microcavités voient leur taille croître, notamment sous l'effet de la tension hydrostatique qui est un facteur prédominant. Celles-ci peuvent se développer sous forme de cavités sphériques, ellipsoïdales ou de fissures. Si la décohésion entre la matrice et une inclusion est totale (Figure II.5b), alors celle-ci ne joue plus un rôle prépondérant. Dans le cas contraire (Figure II.5a), il faut en tenir compte. Durant cette phase de croissance, on observe un adoucissement du comportement mécanique du matériau.



**Figure II.5:** *Croissance des cavités*

**c) Coalescence des cavités :**

Lorsque le taux de porosités atteint une valeur critique de l'ordre de 10% à 15%, il se produit alors un phénomène d'interaction entre les différentes cavités. Effectivement, dès lors que la distance séparant deux cavités est suffisamment faible, celles-ci tendent à se réunir de façon assez brutale (Figure II.6). Un deuxième phénomène, mettant en jeu la striction des ligaments entre cavités existantes, peut également se produire.



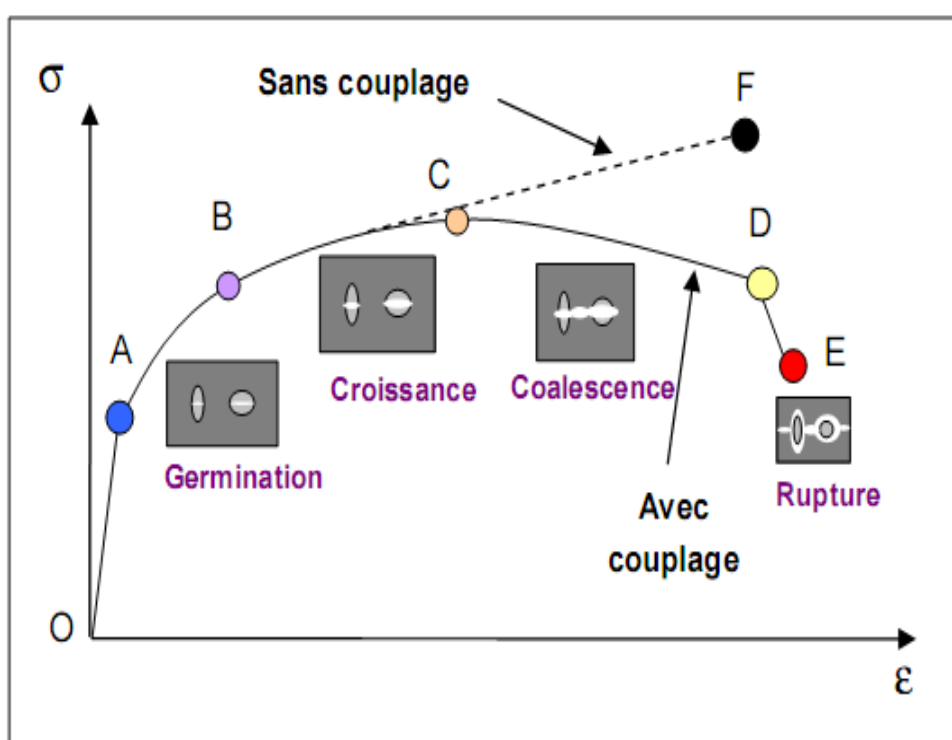
**Figure II.6:** *Coalescence des cavités*

La prédominance de l'un de ces deux phénomènes est fortement liée à l'existence et la répartition de particules de seconde phase. La fin du stade de coalescence correspond à l'amorçage d'une fissure macroscopique qui conduira de manière irréversible à la rupture du matériau.

### II.3.1.3 Rupture ductile d'une éprouvette :

Les mécanismes physiques qui gouvernent l'endommagement interagissent fortement sur le comportement du matériau. Au fur et à mesure que le matériau subit une déformation plastique, ces propriétés mécaniques sont alors altérées par la création d'endommagement.

On parle ainsi de couplage entre l'endommagement et la plasticité. Ceci peut s'illustrer simplement en prenant par exemple le cas d'une éprouvette axisymétrique subissant un essai de traction uniaxiale. La réponse schématique obtenue sur la courbe Contrainte/Déformation est représentée par la Figure II.7 :



**Figure II.7 :** Réponse schématique d'une éprouvette à un essai de traction uniaxiale ([Mariage03])

Dans un premier temps, la déformation appliquée à l'éprouvette est élastique et linéaire (trajet OA). L'endommagement est alors nul. Viennent ensuite les trois mécanismes physiques définis précédemment et amenant à la rupture ductile :

- ✚ la phase de germination des cavités qui sont encore trop petites pour modifier le comportement macroscopique du matériau (trajet AB).
- ✚ la croissance des cavités qui va entraîner un adoucissement progressif de matériau.

Le couplage entre le comportement et l'endommagement ne peut plus être négligé car il devient prépondérant (trajet BC).

✚ la phase de coalescence entre cavités (trajet CD).

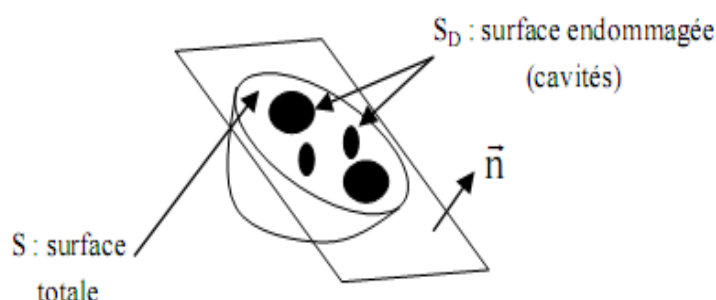
Pour finir, l'apparition de fissures macroscopiques qui vont se propager et provoquer la rupture de l'éprouvette (point E).

Sans couplage entre l'endommagement et la plasticité du matériau, la réponse schématique serait le trajet OABF, ce qui n'est pas en accord avec la réalité expérimentale.

## II.4 Représentations mathématiques du dommage ductile :

### II.4.1 Définition de la variable d'endommagement :

Considérons un matériau endommagé à l'intérieur duquel on isole un élément de volume représentatif (EVR) de taille suffisamment grande par rapport aux hétérogénéités du milieu. On désigne par  $S$  l'aire d'une section de ce volume coupé (Figure II.8) par un plan de normal  $\vec{n}$  et  $S_D$  la surface endommagée (cavités, fissures).



**Figure II .8:** Coupe d'un élément endommagé

La variable d'endommagement est donnée, pour chaque direction  $\vec{n}$  par le rapport entre la surface  $S_D$  et la surface  $S$  :

$$D_n = \frac{S_D}{S} \quad \text{II.10}$$

Cette variable  $D_n$  représente la densité surfacique de défauts dans le plan de normal  $\vec{n}$  :

- $0 \leq D_n < 1$  : Caractérise l'état d'endommagement.
- $D_n = 0$  : Correspond à l'état non endommagé ou vierge.
- $D_n = 1$  : Correspond à l'élément de volume rompu en deux parties selon un plan de normal  $\vec{n}$ .

## II.4.2 Modélisation de l'endommagement ductile :

### II.4.2 .1 Le modèle de Gurson :

Le modèle de Gurson [Gurson77] est le premier modèle micromécanique qui a introduit un couplage entre le comportement et l'endommagement. Le modèle est basé sur la croissance de cavités sphériques et s'inspire des travaux préalables de Rice et Tracey [Rice69].

La présence de cavités dans le matériau, modifie le comportement plastique macroscopique de celui-ci. Il paraît donc intéressant d'introduire une variable d'endommagement relative à ce phénomène physique. La variable d'endommagement  $f$  est alors définie comme étant la fraction volumique de vide (volume des cavités/volume total).

Le critère macroscopique approché auquel il a abouti présente le potentiel plastique  $\Phi$  avec la fonction de la surface d'écoulement dépendant de la contrainte macroscopique et de la fraction volumique de vide distribués au hasard :

$$\phi = \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^2 + 2f \cosh \left( \frac{3P_H}{2\sigma_0} \right) - (1 + f^2) \quad \text{II 11}$$

Avec :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad \text{Contrainte de Von Mises (s étant le déviateur des contraintes),}$$

- $P_H = 1/3 \text{Trace}(\boldsymbol{\sigma})$  : contrainte hydrostatique,
- $\sigma_0$  : contrainte d'écoulement de la matrice.

L'endommagement, par l'intermédiaire de la variable  $f$ , va modifier la surface de charge du critère de plasticité, et ainsi traduire la baisse de capacité résistante du matériau. Dans le cas particulier où  $f$  est égal à 0 (matériau vierge sans endommagement), le critère de plasticité correspond alors à celui de von Mises

$$(\Phi = \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^2 = 1) \quad \text{II.12}$$

La vitesse d'évolution de la fraction volumique, due à la croissance des microcavités, est déterminée à partir de la conservation de la masse :

$$\dot{f}_{\text{croissance}} = (1 - f) \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{pl})$$

Où  $\boldsymbol{\epsilon}_{pl}$  représente le tenseur du taux de déformation plastique.

Néanmoins, ce modèle ne prend pas en compte les interactions entre microcavités.

Pour rendre compte du phénomène d'interaction, Tvergaard et Needleman ([Tvergaard84]) ont modifié le modèle de Gurson en ajoutant de nouveaux paramètres,  $q_1$ ,  $q_2$  et  $q_3$  tels que :

$$\phi = \left( \frac{\sigma_{eq}}{\underline{\sigma}} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( \frac{3q_2 f^* P_H}{2\underline{\sigma}} \right) - (1 + q_3 f^{*2}) \quad \text{II 13}$$

Avec :

$$f^* = \begin{cases} f & \text{pour } f \leq f_c \\ f_c + \delta(f - f_c) & \text{pour } f > f_c \end{cases} \quad \text{et } \delta = \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} \quad \text{II 14}$$

Où

$\delta$  : représente l'accélération de la croissance de porosité.

$f_c$  : La fraction volumique critique de vides.

$f_u^*$  : La valeur ultime de  $f^* = \frac{1}{q_1}$ .

$f_F$  : La fraction volumique de vides lors de la rupture finale.

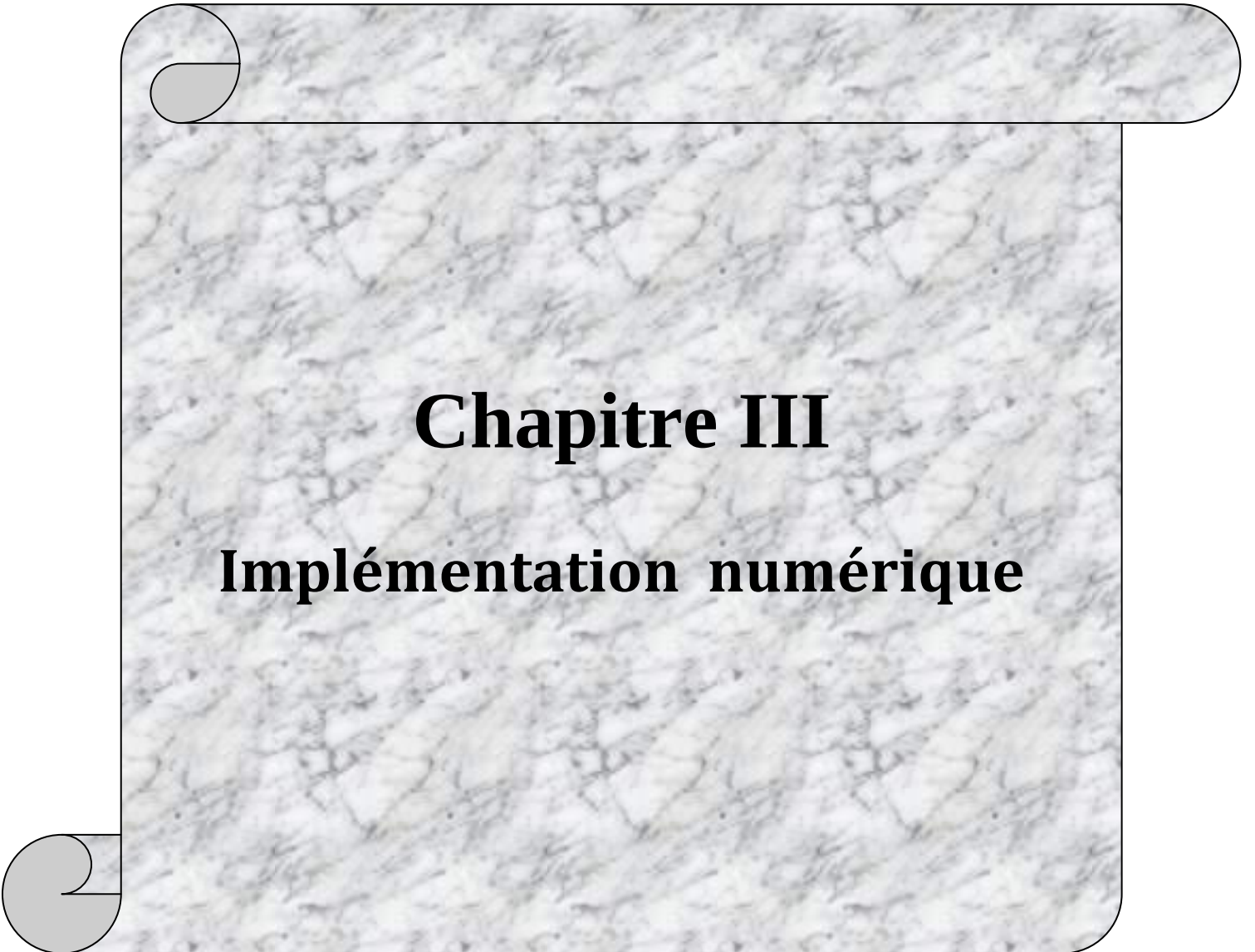
Pour analyser une structure fissurée par le modèle donné par GURSON, TVERGAARD et NEEDLEMAN (GTN), nécessite la détermination de plusieurs paramètres :

- ✓ les paramètres constitutifs, généralement sont fixés à :  $q_1=1.5$ ,  $q_2=1$  et  $q_3=(q_1)^2$ .
- ✓  $f_0$  est la porosité initiale, elle est un paramètre lié au matériau.
- ✓  $f_c$  correspond au début de la coalescence, c'est un paramètre ajustable en utilisant la simulation numérique, et peut être déterminé à partir d'analyses microscopiques.

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation des principaux phénomènes mécaniques caractéristiques du comportement des métaux subissant une mise en forme par grande déformation plastique (emboutissage).

Le troisième chapitre sera consacré à l'intégration numérique du modèle élastoplastique, couplé à l'endommagement dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS, en suite on fait la présentation de ce logiciel.

The image shows a book cover with a light-colored, marbled paper pattern. The cover has a rectangular shape with rounded corners. There are three decorative corner tabs: a small one at the top-left, a medium one at the top-right, and a large one at the bottom-left. The text is centered on the cover.

# **Chapitre III**

## **Implémentation numérique**

### III.1 Introduction :

Dans le chapitre II, nous avons présenté l'ensemble des modèles censés décrire les principaux phénomènes macroscopique mise en jeu lors de la mise en forme de pièce métallique par grande déformations (emboutissage, hydroformage...) .ces modèles de comportement, élastoplastique couplé à l'endommagement doivent être implémenté dans le code de calcul par les éléments finis ABAQUS.

Ce dernier, offre la possibilité d'introduire de nouvelles lois de comportement, en utilisant des sous-routines utilisateurs, qui dépendent du schéma de résolution choisi. La sous-routine UMAT, est utilisée pour la simulation avec un schéma Statique Implicite (S.I), alors que la sous-routine VUMAT est employée avec un schéma Dynamique Explicite (D.E).

### III.2 Implémentation numérique

#### III .2.1 Discrétisation spatiale. Principe des puissances virtuelles (PPV) :

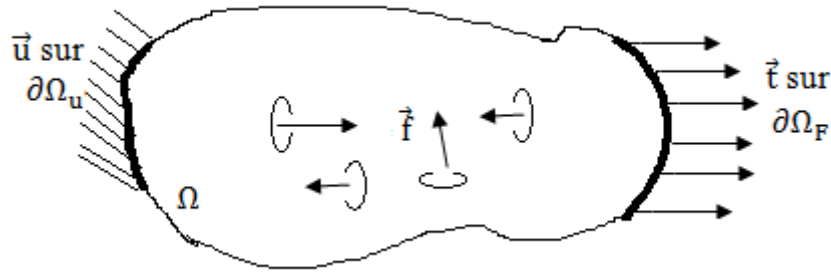
- **Position du problème mécanique :**

Soit un solide  $\Omega_0$  d'un matériau ayant un comportement élasto-plastique endommageable ce solide occupe un volume initial de volume initial  $V_0$  de frontière  $S_0$  dans sa configuration initiale non déformée  $\Omega_0$ , libre de toute contrainte initiale.

Après déformation, le solide occupe une nouvelle configuration  $\Omega$  de volume  $V$  et de frontière  $S$ . Le solide dans sa configuration actuelle est soumis à :

- Force volumique  $\vec{f}$  dues à la masse de la structure ;
- Force surfaciques  $\vec{t}$  appliquer sur une portion  $s_t$  de  $s$  ;
- Force de contacts  $\vec{t}_c$  Sur une partie  $s_c$  de  $s$
- Des déplacements imposés  $\vec{u}$  sur une partie  $s_u$  de  $s$  (le champ de déplacement étant cinématiquement admissible CA) ;

Avec  $S = s_t \cup s_c \cup s_u$  et  $s_t \cap s_c \cap s_u = \emptyset$ .



**Figure III.1 :** conditions aux limites.

Dans cette étude on utilise une formulation lagrangienne réactualisée .le problème à résoudre consiste à déterminer dans un intervalle de temps  $[0, T]$  le vecteur déplacement  $\vec{u}$  , le tenseur de déformations  $\underline{\varepsilon}(x,t)$ ,le tenseur de contrainte  $\underline{\sigma}(x, t)$  et l'ensemble des variables d'état décrites dans le chapitre précédent.

Les inconnues du problème doivent vérifier les équations suivantes :

- Equation d'équilibre :

$$\overrightarrow{\text{div}} \underline{\sigma} + \vec{f} = \rho \vec{\ddot{u}} \quad \text{III 1}$$

- Les équations de compatibilité cinématique :

$$\underline{D} = \frac{1}{2} [\text{grad} \vec{\ddot{u}} + (\text{grad} \vec{\ddot{u}})^T] \quad \text{III 2}$$

- L'ensemble des équations de comportement dans  $\Omega$  (voir le chapitre II).
- les conditions aux limites sur la frontière  $S$  :

$$[\sigma] \{ \vec{u} \} = \{ \vec{t} \} \text{ sur } s_t$$

$$[\sigma] \{ \vec{u} \} = \{ \vec{t}_c \} \text{ sur } s$$

$$\vec{u} = \vec{u}^* \text{ sur } s_u$$

- Les conditions initiales relatives à chaque champ mécanique.

Dans Les expressions  $\vec{\ddot{u}}$  et  $\vec{\ddot{u}}$  représentent les vecteur vitesses et accélération en champ point du solide.

Le Principe des Travaux Virtuels (P.T.V),ou l'écriture faible du problème mécanique ci-dessus, s'écrit:

$$\int_V \varepsilon^* : \sigma dV - \int_V u^* \cdot f_V dV - \int_{S_F} u^* \cdot f_S dS - \int_{S_C} u^* \cdot f_C dS = \int_V \rho \ddot{u} \cdot u^* dV$$

**III 3**

Où  $u^*$  est le champ de déplacements virtuels cinématiquement admissible et  $\varepsilon^*$  est le champ de déformations virtuelles.

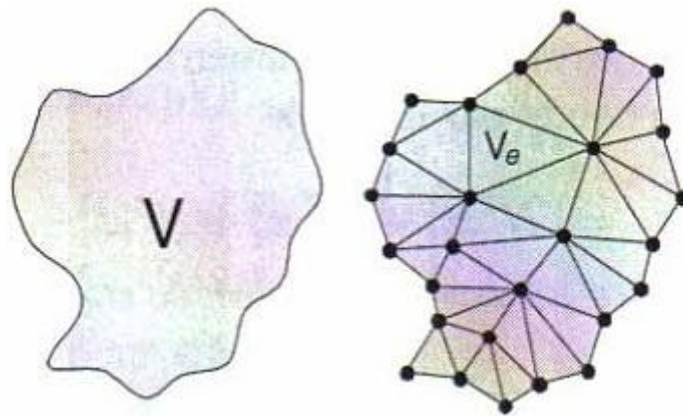
- ✚ La résolution du problème dévolution ci-dessus (équation (.3)) nécessite le recours à:
- ✚ La discrétisation spatiale du domaine C par éléments finis;
- ✚ La discrétisation temporelle du domaine  $[0, T]$  en utilisant un schéma approprié par Différences finies.

### III.2.2 Discrétisation spatiale du P.T.V :

Considérant le domaine discrétisé en sous-domaines de volume élémentaires  $V_e$  (figure.1) Les éléments sont considérés comme isoparamétriques, la géométrie de chaque élément est approchée par les mêmes fonctions de forme que le champ des déplacements. Les Champs de déplacement réel et virtuel sont alors:

$$\begin{cases} \{u_e\} = [N_N]\{u_e^N\} \\ \{\delta u_e\} = [N_N]\{\delta u_e^N\} \end{cases}$$

III 4



**Figure III.2 :** *Discrétisation du domaine C.*

Où  $[N_N]$  est la matrice des fonctions d'interpolations du nœud  $\langle N \rangle$  de l'élément  $\langle e \rangle$ ,  $\{u_e^N\}$  est le vecteur déplacement de même nœud.

Par dérivation, Les vitesse réelles et virtuelle et l'accélération pour un même élément sont interpolées de la manière:

$$\begin{cases} \{\dot{u}_e\} = [N_N]\{\dot{u}_e^N\} \\ \{\delta\dot{u}_e\} = [N_N]\{\delta\dot{u}_e^N\} \end{cases} \quad \text{III.5}$$

Et l'accélération réelle pour l'élément < e > est donnée par :

$$\{\ddot{u}_e\} = [N_N]\{\ddot{u}_e^N\} \quad \text{III.6}$$

La matrice masse cohérente de l'élément < e > est donnée par :

$$[M_N^e] = \int_{V_0^e} \rho_0 [N_N][N_N]^T dV_0^e \quad \text{III.7}$$

Le vecteur des efforts intérieurs pour l'élément < e > est donné par :

$$[F_{e/int}^N] = \int_{V_e} [B_N^e]^T : \{\underline{\sigma}\} dV \quad \text{III.8}$$

Avec :  $[B_N^e] = \frac{\partial N}{\partial X_N}$  est la matrice déformation-déplacement de l'élément < e >.

Le vecteur des efforts extérieurs pour l'élément < e > est donné par :

$$[F_{e/ext}^N] = \int_{V_e} [N_N]^T \{\vec{f}\} dV + \int_{\partial\Omega_F} [N_N]^T \{\vec{t}\} d\Omega_F \quad \text{III.9}$$

Toutes ces équations indiquées ci-dessus nous conduisent à écrire la fonctionnelle élémentaire suivantes :

$$\{I_e\} = ([M_N^e]\{\ddot{u}_e^N\} + [F_{e/int}^N] - [F_{e/ext}^N])\{\delta\dot{u}_e^N\} \quad \text{III.10}$$

L'équilibre global de solide s'écrit :

$$\{I\} = \sum_e \{I_e\} = \sum_e ([M_N^e]\{\ddot{u}_e^N\} + [F_{e/int}^N] - [F_{e/ext}^N]) \delta \dot{U}^N = 0 \quad \text{III.11}$$

$\delta \dot{U}^N$  Est le vecteur global des déplacements virtuels cinématiques admissible de toute la structure.

Après assemblage, cette équation s'écrit comme suit :



Dans le cas statique :

$$F_{e/int}^N - F_{e/ext}^N = R^N(U^M) = 0 \quad \text{III.12}$$

$R^N$  Est la composante du résidu de l'équilibre associé à la  $N^{ième}$  variable du problème.

$U^M$  Est la valeur de la  $M^{ième}$  variable.



Dans le cas dynamique :

$$M^{NM}\ddot{U}^M + R^N(U^M) = 0 \quad \text{III.13}$$

### III.3 méthode de résolution :

La résolution des problèmes (III.12) et (III.13), s'effectue à l'aide d'une analyse statique implicite, ou une analyse dynamique explicite, c'est cette dernière qui nous intéresse pour la simulation des procédés de fabrication, mais avant de passer à cette analyse, nous devons faire un aperçu sur la méthode statique implicite de Newton-Raphson.

#### III.3.1 Analyse statique implicite ((schéma de Newton-Raphson)) :

Pour résoudre le système (III.14), nous utilisons la méthode classique de Newton-Raphson, qui consiste à discrétiser le chargement total en plusieurs incréments et à chercher les configurations  $C^1, C^2, \dots, C^n$  correspondant aux différents pas de chargement. La détermination de la configuration  $C^{n+1}$ , à partir de la configuration  $C^n$ , se fait de une manière itérative, en effectuant un développement limité de  $R(U)$ , au voisinage d'une solution approchée  $U_i$ , on obtient :

$$R(U_i + \Delta U_i) = R(U_i) + \frac{\partial R(U_i)}{\partial U_i} \Delta U_i + \dots = 0 \quad \text{III.14}$$

L'incrément de déplacement  $\Delta U_i$  qui vérifie (III.14) est obtenu itérativement à partir du système :

$$K_T(U_i) \Delta U_i = R(U_i) \quad \text{III.15}$$

$K_T(U_i) = \frac{\partial R(U_i)}{\partial U_i}$  : Matrice tangente du système linéaire, qui joue un rôle central dans les performances numériques (vitesse de convergence) de ce schéma itératif implicite.

Avec :

$$R_e(U) = \int_{V_e} [B_N^e] : \{\underline{\sigma}\} J_v dV + \int_{V_e} [N_N]^T J_v \{\vec{f}\} dV + \int_{\partial\Omega_F} [N_N]^T J_F \{\vec{t}\} d\Omega_F \quad \text{III.16}$$

Où  $J_v$  et  $J_F$  sont respectivement les Jacobiens de volume et de surface entre l'élément de référence et l'élément réel et actuel.

L'estimation du déplacement de la configuration  $C^{n+1}$  est la suivante :

$$U_{i+1} = U_i + \Delta U_i \quad \text{III.17}$$

Ce processus itératif s'arrête quand le  $\Delta U$  obtenu vérifie l'équilibre de (III.16) à une précision donnée.

La résolution du système (III.13), dans ABAQUS/Standard est réalisée avec un algorithme incrémental implicite de Newton.

### III.3.2 Analyse dynamique explicite :

Cette analyse, utilise un algorithme explicite qui consiste à obtenir une solution de système (III.15), à l'instant  $t + \Delta t$  en fonction des quantités connues à l'instant  $t$  exclusivement. Comme toute méthode explicite, elle est conditionnellement stable en fonction de la taille du pas  $\Delta t$ . Par contre, elle a l'avantage de ne pas nécessiter des itérations ni de construction d'une matrice tangente. Cette méthode est implémentée dans le code ABAQUS/Explicit dédié à la simulation numérique des procédés de fabrication.

La règle explicite d'intégration, est tout à fait simple mais par elle-même, ne fournit pas l'efficacité informatique liée au procédé explicite de dynamique. La clef de l'efficacité informatique du procédé explicite est l'utilisation de la matrice masse diagonale, car l'accélération au début de l'incrément, est calculée par :

$$\ddot{U}_i = M^{-1} R_i \quad \text{III.19}$$

Connaissant l'accélération, les équations du mouvement pour le solide sont intégrées en utilisant la méthode centrale explicite d'intégration de différence qui se traduit par :

$$\dot{U}_{i+\frac{1}{2}} = \dot{U}_{i-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{i+1} + \Delta t_i}{2} \ddot{U}_i \quad \text{III.20}$$

$$U_{i+1} = U_i + \Delta t_{i+1} \dot{U}_{i+\frac{1}{2}} \quad \text{III.21}$$

Avec  $\dot{U}(0) = 0$  à  $t=0$ .

Cette stratégie de résolution, est facile à mettre en œuvre dans la mesure où elle ne nécessite ni calcul de la matrice tangente, ni d'effectuer des itérations. Il suffit de calculer et d'inverser la matrice masse, de calculer l'accélération  $\ddot{U}_i$  au début de l'incrément (Eq III.20), puis la vitesse  $\dot{U}_{i+\frac{1}{2}}$  au milieu

de l'incrément (Eq III.21), et enfin, le déplacement  $U_{i+1}$  en fin d'incrément. Il est à noter que la matrice masse cohérente défini par (Eq III.9), peut être remplacée par sa matrice diagonale.

Cependant, un contrôle automatique du pas de temps (prévu par ABAQUS) est nécessaire, afin d'assurer la stabilité de la solution.

La stabilité d'un schéma explicite est donnée par la taille de l'incrément de temps  $\Delta t$ . La limite de stabilité pour une solution non amortie est donnée par :

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \quad \text{III.22}$$

Où :  $\omega_{\max}$  est la plus grande valeur propre du système d'équations mécaniques.

Pour contrôler les oscillations à hautes fréquences, un facteur d'amortissement a été introduit. Ce qui nous donne comme nouveau domaine de validité :

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi) \quad \text{III.23}$$

Où :  $\xi$  est la valeur de l'amortissement critique ( $\xi \leq 1$ ), dans le mode d'oscillations le plus élevé. Grâce à ce coefficient, on a pu réduire la valeur de l'incrément de temps.

Le calcul de la plus grande valeur propre du système, peut être trouvé si l'on détermine, le mode maximum de dilatation volumique sur l'ensemble des éléments.

De ceci, une approximation de la limite de stabilité de la solution mécanique est donnée par :

$$\Delta t \approx \frac{L_{\min}}{C_d} \quad \text{III.24}$$

Où :  $L_{\min}$  est la plus petite dimension de l'élément du maillage, et  $C_d$  est la vitesse d'une onde solide traversant l'élément. Cette vitesse peut être déterminée, en calculant les différents modules effectifs du matériau élastique de la réponse matérielle :

$$\Delta t = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{III.25}$$

Où :  $\rho$  est la densité du matériau,  $\lambda$  et  $\mu$  Coefficients classiques de Lamé donnés par les équations suivantes :

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{III.26}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{III.27}$$

### III.4 Présentation du logiciel Abaqus :

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS), devenue après ABAQUS, Inc. Depuis 30 ans, ABAQUS a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer les nouveautés et répondre ainsi aux besoins en octobre 2005, l'entreprise a été rachetée par Dassault industries pour critiquer le package ''SIMULIA''.

A partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe **.inp**), ABAQUS décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les calculs demandés et fournit les résultats dans un fichier **.odb**.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier **.odb** (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise.

Il faut savoir que le prétraitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

La génération du fichier de données

- Le lancement du calcul proprement dit
- L'exploitation des résultats.

#### III.4.1 La simulation numérique :

La simulation numérique par éléments finis des procédés de mise en forme est aujourd'hui une réalité industrielle. Elle permet de mettre au point, des études en réduisant recours à la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur-correction qui est beaucoup plus couteuse. Ainsi des logiciels de mise en forme (Forge2, Forge3, développés dans le but de simuler des phénomènes physiques intervenant en mise en forme des pièces. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement la mise en forme d'un matériau et de jouer sur certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d'en optimiser le procédé. La simulation de l'endommagement dans les procédés de mise en forme a pour but de prédire ou et quand un endommagement

significatif apparaît. Pour ce faire, les principaux phénomènes et leurs interactions doivent être correctement pris en compte.

### III.5 Les principaux modules :

Abaqus est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécanique. Il se compose de trois produits : Abaqus /Standard, Abaqus /Explicit et Abaqus /Cae.

- **Le solveur Abaqus /Standard** est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- **Le solveur Abaqus /Explicit** emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.
- **Abaqus /CAE** constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des produits additionnels ou/et optionnels, spécifiques à certaines applications.

En raison du large spectre de ces capacités d'analyse et sa bonne ergonomie il est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. Il se prête bien pour l'analyse des comportements non-linéaires. Il possède une vaste gamme de lois de comportement. En 2005, Abaqus/Inc a été acquis par Dassault Systèmes et est devenu SIMULIA.

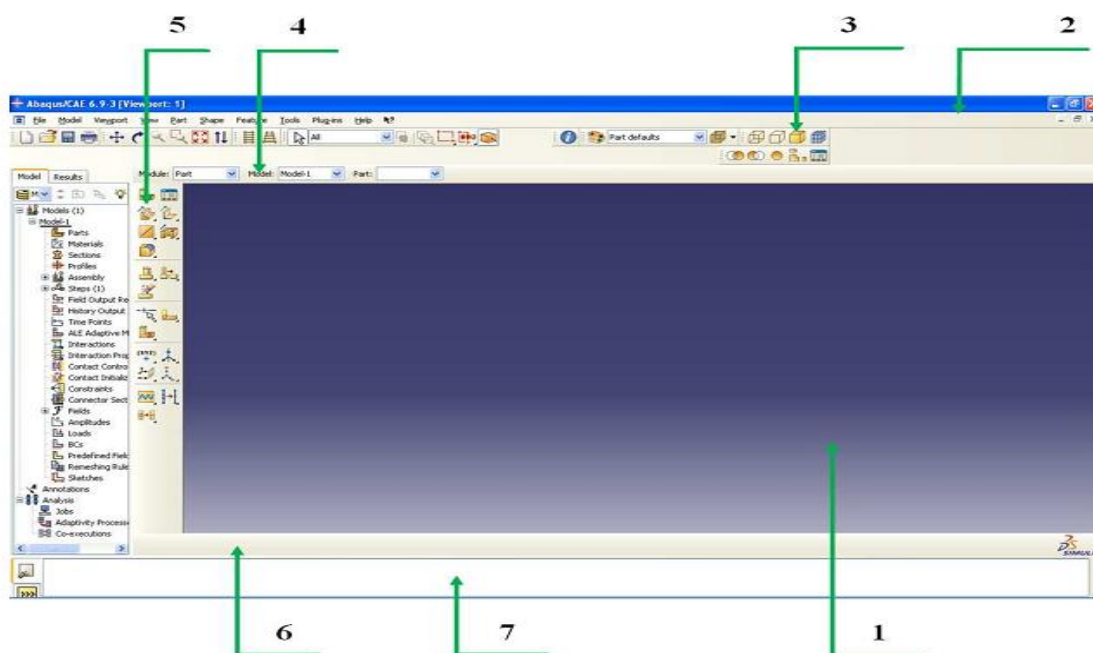


Figure III.3: L'interface d'Abaqus/Cae

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivant :

- 1 : la fenêtre d'affichage graphique.
- 2 : une première barre de menus en haut, ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve.
- 3 : une deuxième barre horizontale d'outils, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.).
- 4 : une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
- 5: on dispose à gauche d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
- 6 : l'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel Abaqus vous parle : les messages affichées à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise.
- 7 : enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

Un petit rappel des actions effectuées pour créer un modèle Abaqus

**1) Dessiner le modèle :** le module **PART** permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans Abaqus Cae, soit en les important d'un autre logiciel de dessin.

Dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle

-  Dessiner le profil 2D de la forme voulue.
-  Le développer en 3D.
-  Rajouter les détails manquants (chanfreins...).

**2) Affecter les propriétés matériau à l'objet :** le module **PROPERTY** permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

-  Créer le matériau 

-  Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 

-  Affecter les matériaux aux sections correspondantes 

**3) Assembler le modèle :** le module **ASSEMBLY** permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.



créer les instances



les positionner dans le repère général

#### 4) Définir les étapes d'analyse :

Le module **STEP** permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement on peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées ; et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées.

#### 5) Créer les interactions entre les instances:

Le module **INTERACTION** permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisantes, la procédure de spécification des interactions est la suivante :



Créer les surfaces



Définir les types de contacts



Associer des surfaces avec des types de contact

#### 6) Appliquer les conditions aux limites et les chargements :

Le module **LOAD** permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut que les chargements et les conditions limites soient dépendants des Steps, par exemple une force est appliquée au **Step 1** mais inactive au **Step 2**.



Définir les étapes d'application



Définir les types de CL et/ou chargement

#### 7) Mailler le modèle :

Le module **MESH** contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage :



Partitionner le modèle.



Choisir les techniques de maillage.



Choisir les types d'éléments.

-  Discrétiser le modèle.
-  Mailler le modèle

#### 8) Créer et soumettre un calcul :

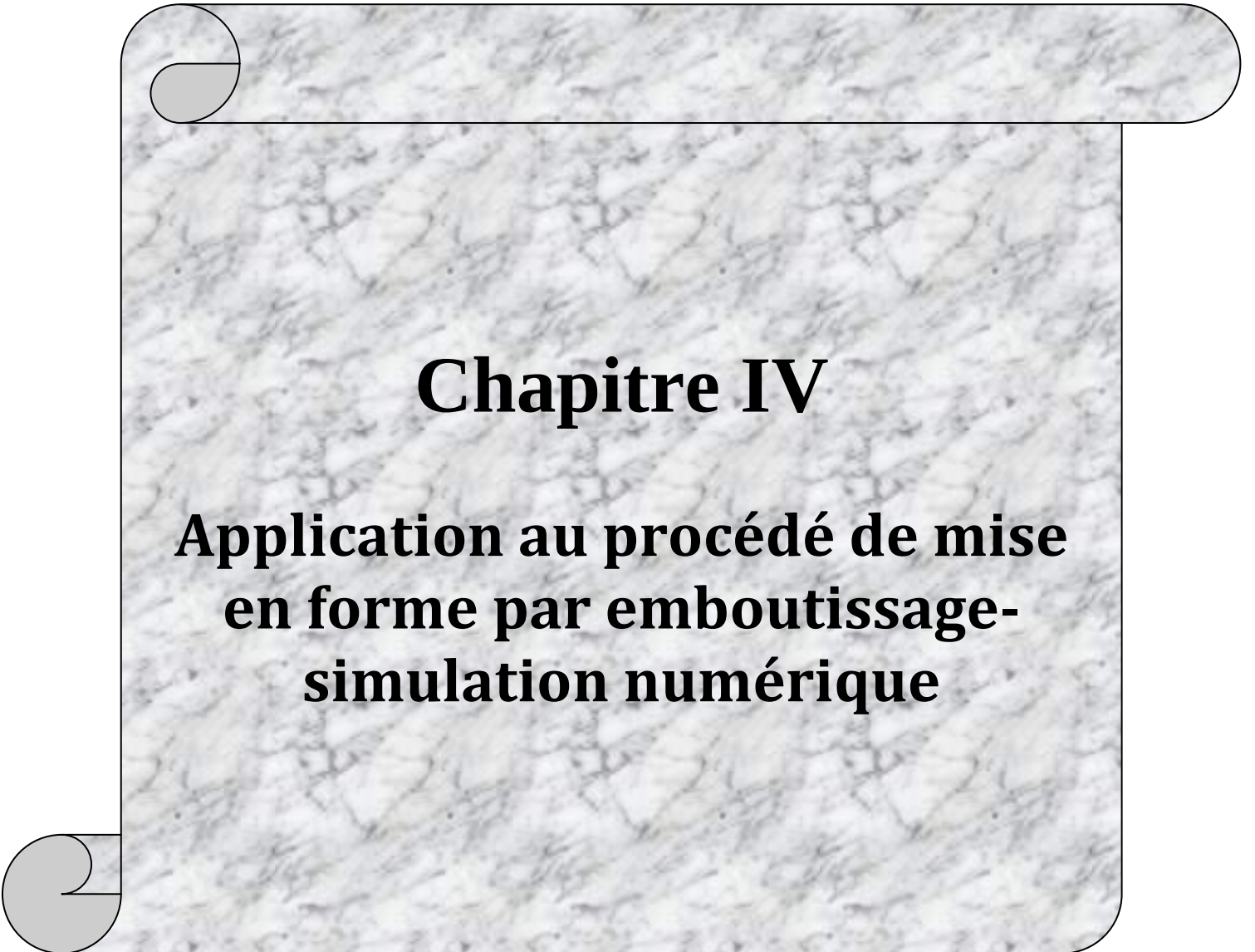
Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module **JOB** pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traiter les résultats demandés.

9) Visualiser les résultats : le module **VISUALIZATION** permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations

10) Le module « **SKETCH** » : ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

### III.6 Conclusion

Après avoir présenté au chapitre II, les modèles de comportements, dans le cadre de l'endommagement ductile. Il est utile de développer dans le contenu de ce chapitre, les techniques mathématiques, utilisées pour résoudre le problème couplé du comportement élastoplastique-endommagement, et l'implémentation de ces modèles, dans le programme de calcul par élément finis ABAQUS, afin de faire la simulation numérique d'emboutissage, qui fera l'objet de quatrième chapitre. Nous avons présenté le code de calcul ABAQUS, en résumant les actions principales à effectuer pour créer un modèle de simulation.



# **Chapitre IV**

**Application au procédé de mise  
en forme par emboutissage-  
simulation numérique**

### IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats numériques obtenus par notre travail, qui est basé sur la simulation numérique de procédé de mise en forme par l'emboutissage, dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS.

Nous décrivons le matériau testé et nous exposons les résultats obtenus avec Abaqus. Par la suite nous comparons les prédictions numériques aux résultats expérimentaux.

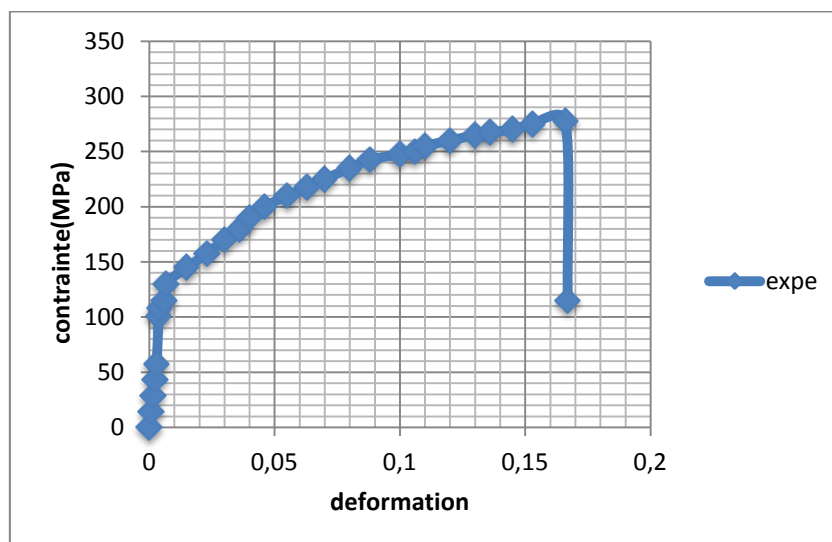
### IV.2 Test homogène :

Ce test a pour but de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'aluminium, afin de l'utiliser pour la simulation de l'essai d'emboutissage en 3D.

Mis à part le module de Young, le coefficient de Poisson et la limites élastique qui ont été fournis par les travaux de Khelifa [Khe04], nous tentons de déterminer les paramètres de modèle de GURSON (GTN) :

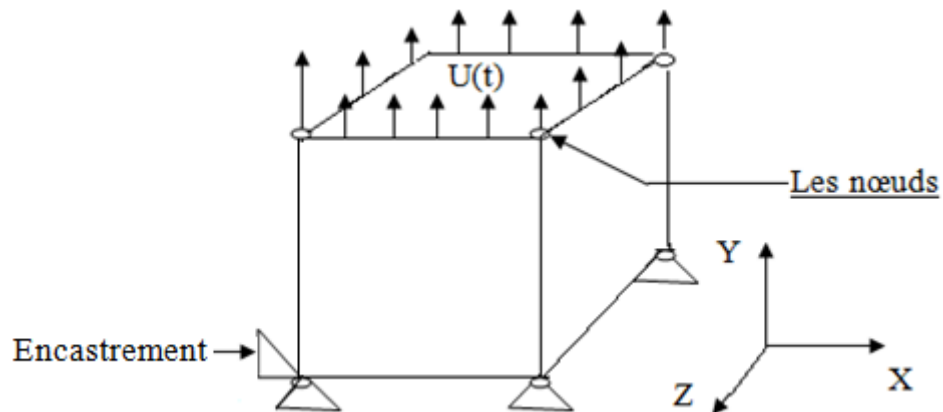
- Les paramètres constitutifs  $q_1$ ,  $q_2$  et  $q_3$ ,
- La fraction volumique critique de vides  $f_c$ ,
- La porosité initiale  $f_0$ .

Ces paramètres seront déterminés par la simulation numérique sur le logiciel ABAQUS, avec un étalonnage ou un calibrage, des courbes Contrainte-Déformation obtenues par cette simulation, à la courbe expérimentale donnée par Khelifa [Khe04] (figure IV. 1):



**Figure IV. 1 :** courbe expérimentale Contrainte-Déformation pour l'Aluminium [Khe04]

Nous nous plaçons dans un cadre schématisé par la figure(IV.2), représentant une traction unidirectionnelle d'un élément de volume représentatif (EVR) en test homogène, sous une sollicitation extérieure monotone, en imposant un encastrement d'un côté et un déplacement  $U(t)$  d'un autre côté suivant l'axe Y.



**Figure IV.2:** schématisation de l'élément de volume représentatif (EVR).

Les caractéristiques mécaniques constituant de l'Al (issues des travaux de Khelifa [Khe04], sont indiquées dans le tableau ci-dessous:

• **Caractéristiques élastiques :**

| E(MPa) | $\mu$ | $\sigma_e$ (MPa) |
|--------|-------|------------------|
| 700000 | 0.30  | 114              |

**Tableau IV.1 :** caractéristiques élastiques de l'Aluminium [Khe04].

- **Caractéristiques plastiques**

| Contrainte plastique | Déformation plastique |
|----------------------|-----------------------|
| 114                  | 0                     |
| 130                  | 0,00639286            |
| 145                  | 0,01477571            |
| 157                  | 0,02275714            |
| 170                  | 0,02974286            |
| 180                  | 0,03572857            |
| 190                  | 0,03971429            |
| 200                  | 0,0457                |
| 210                  | 0,05469               |
| 217                  | 0,06267857            |
| 225                  | 0,06966429            |
| 235                  | 0,07965429            |
| 242                  | 0,08764714            |
| 247                  | 0,09964286            |
| 250                  | 0,10563571            |
| 255                  | 0,10962857            |
| 260                  | 0,11962143            |
| 265                  | 0,12961857            |
| 267                  | 0,13561429            |
| 270                  | 0,14460714            |
| 275                  | 0,15260357            |
| 277                  | 0,166                 |

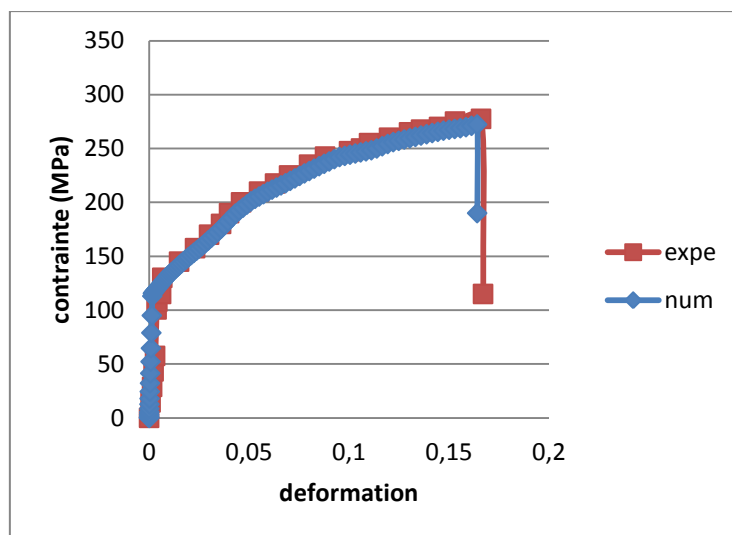
**Tableau IV.2 :** contraintes-déformation dans la zone d'écrouissage

Pour le modèle de GURSON (GTN), les paramètres recherchés sont donnés par le tableau suivant :

| Paramètres | $q_1$ | $q_2$ | $q_3$ | $f_c$   | $f_f$  |
|------------|-------|-------|-------|---------|--------|
| Valeurs    | 1.5   | 1     | 2.25  | 0.00119 | 0.0012 |

**Tableau IV.3 :** paramètres du modèle de GURSON(GTN) pour (Al) étudié.

Ces paramètres ont été obtenus par le calibrage de la courbe numérique à la courbe expérimentale, cela est montré par la figure IV.3.



**Figure IV.3 :** Superposition de la courbe expérimentale et numérique de la Contrainte-Déformation.

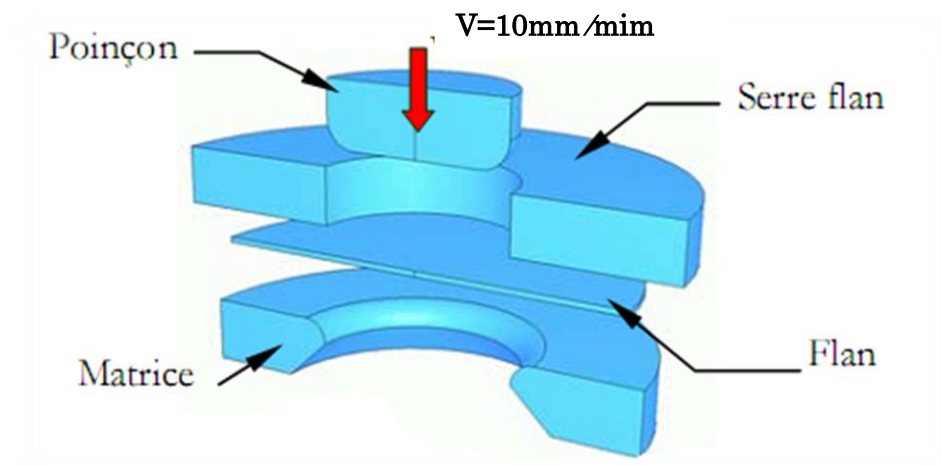
Les paramètres nécessaires au calibrage, de la courbe numérique à la courbe expérimentale, sont déterminés, donc on passe à la simulation numérique de procédé d'emboutissage.

### IV.3 Simulation numérique d'emboutissage :

#### IV.3.1 Emboutissage de Swift :

Cet essai réalisé par Swift en 1951 consiste en l'emboutissage à l'aide d'un poinçon à fond plat d'une éprouvette circulaire maintenue entre la matrice et le serre flan de manière qu'elle puisse glisser.

La méthode Swift a été largement utilisée, spécialement après 1960, étant considérée comme un essai standard pour l'appréciation de la déformation des tôles par l'emboutissage profond. Cette exemple a été traite expérimentalement par le CETIM/senlis [Kne04] et numériquement avec les logiciels commerciaux Stampack et notre logiciel abaqus.



**Figure IV .4 :** Schématisation de l'essai d'emboutissage de Swift.[Khe04]

Dans le cas général, le rôle de chacun des composants de l'outillage peut être décrit comme suit :

- ✚ le poinçon couissant plus ou moins vite sur l'axe vertical déforme la tôle à son empreinte au fond de la matrice;
- ✚ la matrice sert d'appui à la pièce; elle contribue aussi à donner la forme extérieure finale au retour élastique près;
- ✚ le serre-flan permet de prévenir les risques de plis du flan au cours du procédé et contribue à l'obtention d'un écoulement homogène du métal.

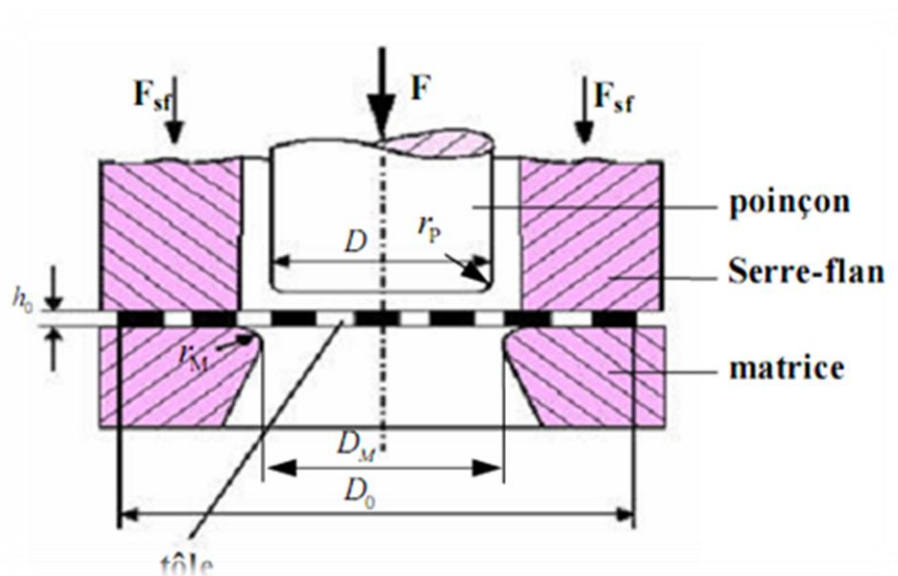
### IV.3.2 : Description des conditions de la simulation :

En vue de simuler l'essai d'emboutissage on doit définir premièrement la forme et les dimensions des outils et des éprouvettes.

L'éprouvette circulaire(flan) est de type déformable ,et les outils sont des éléments rigides définis par l'option « analytical rigid ».

Les dimensions de l'outillage et du flan utilisés pour effectuer l'essai de Swift sont indiquées sur la figure IV.5. Nous en résumons les principales [Khe04] :

- Diamètre extérieur matrice = 100mm
- Diamètre intérieur matrice = 35.2mm
- Hauteur matrice = 10.5mm
- Rayon de raccordement matrice = 4mm
- Diamètre extérieur serre flan = 90mm
- Diamètre intérieur serre flan = 33.9mm
- Hauteur serre flan = 10.5mm
- Diamètre poinçon = 33mm
- Rayon de raccordement poinçon = 5mm
- Diamètre du flan = 73mm
- Epaisseur du flan = 1mm



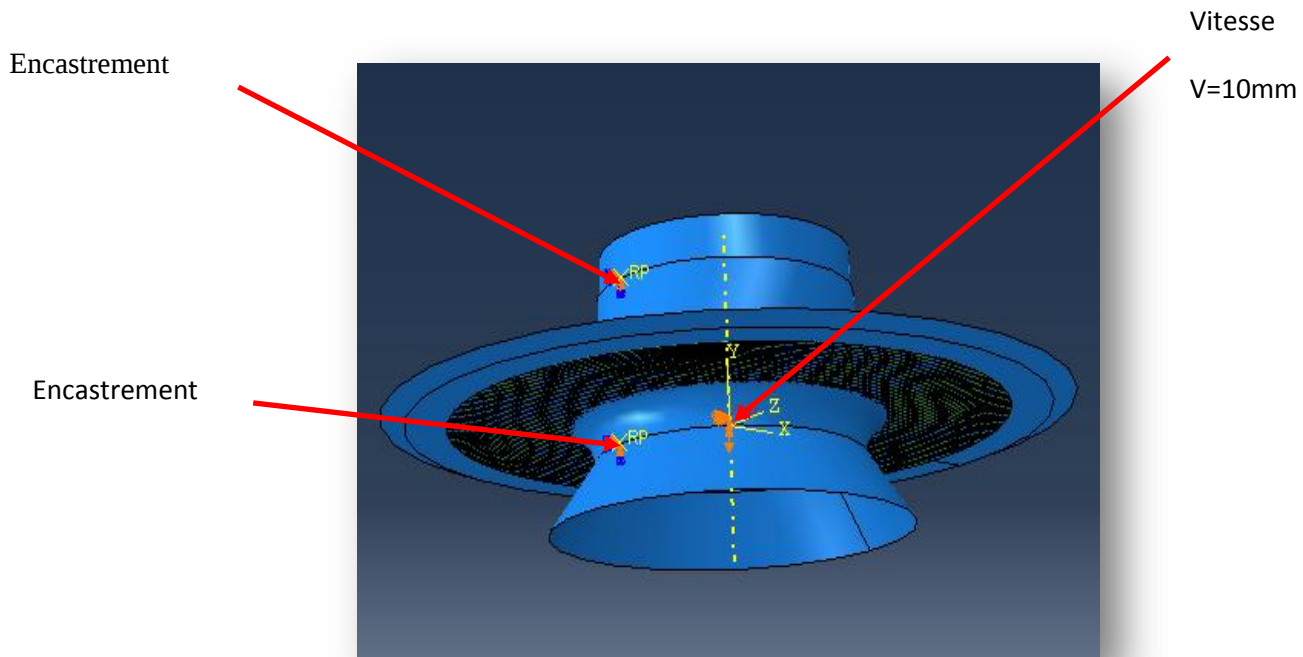
**Figure IV.5** dimensions de l'outillage et du flan

### IV .3. 3 Les conditions aux limites :

La simulation a été réalisée dans ce cas-ci en deux étapes. Les conditions principales qui s'imposent dans la première étape sont: la matrice et le poinçon doivent être fixés (les déplacements et les rotations sur toutes les directions doivent être nulles), on applique une force de 500 daN au serre-flan sur la direction 2, les déplacements et les rotations sur les autres directions étant nulles, figure IV.6

Dans la deuxième étape on garde les conditions imposées à la matrice et au serre-flan. Dans cette étape-ci on applique une vitesse de 10mm/min dans le nœud de référence du poinçon.

Le contact qui se réalise entre les surfaces est égale à 0.17 ( $\mu=0.17$ )



**Figure VI.6 :** *représentation des conditions aux limites*

#### IV.3.4 Le maillage :

Le maillage de l'éprouvette influence les résultats par le fait que si les éléments sont très grands les déformations et les contraintes ne sont pas calculées correctement.

Le maillage doit être suffisamment fin afin de ne pas influencer les résultats. Le nombre d'éléments doit d'autre part être limité en raison du temps de calcul qui croît fortement avec le nombre des éléments. La discrétisation de l'éprouvette doit être réalisée avec un compromis entre le temps de calcul qui doit être raisonnable, et le nombre des éléments qui doit être suffisant pour donner le plus réellement possible les contraintes et les déformations de la pièce emboutie.

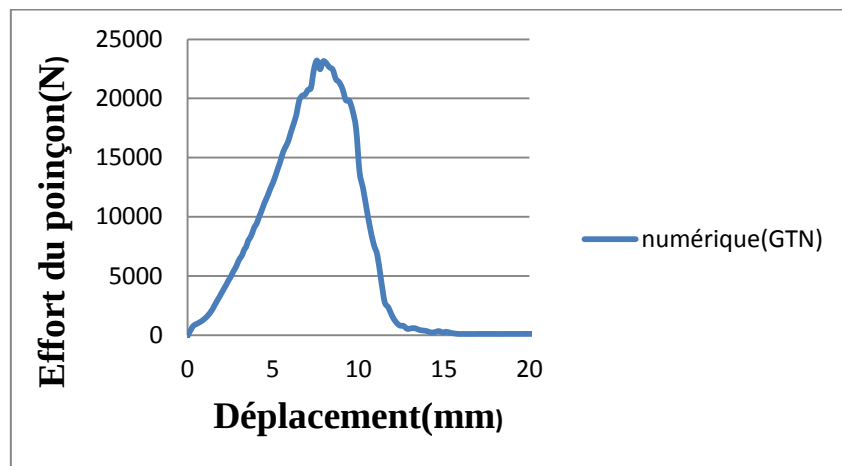
Le maillage du flan est de type quadratiques à huit nœuds de type C3D8R (briques à 8 nœuds), donnés par ABAQUS. (Deux couches d'éléments dans

l'épaisseur du flan), la taille minimal de l'élément dans le plan de flan est 2mm ( $\Delta X=2\text{mm}$ ), et dans l'épaisseur est de 0.5mm ( $\Delta X=0.5\text{mm}$ )

#### IV.4 Etude de l'évolution de l'effort d'emboutissage :

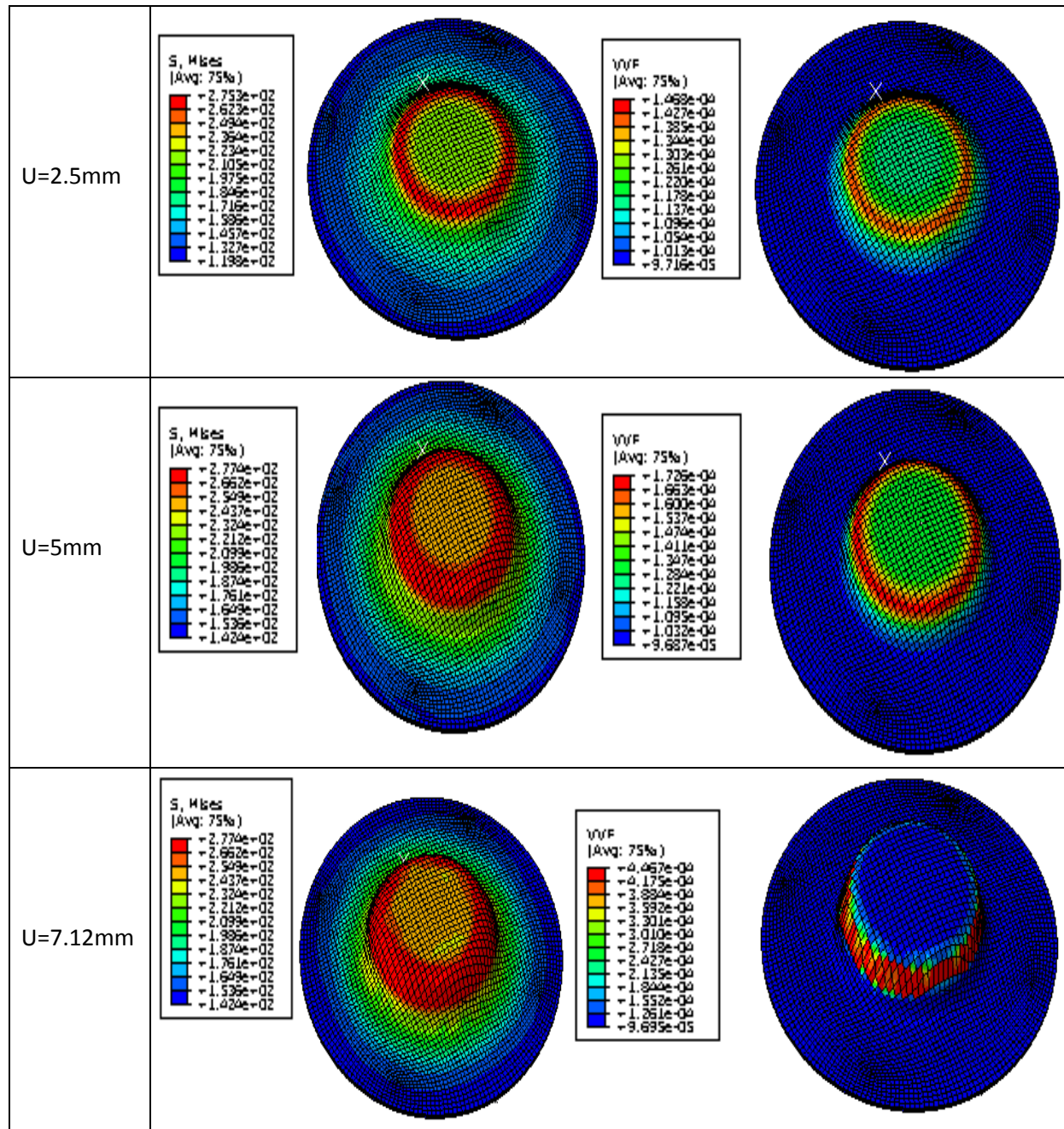
Pour étudier l'effort lors de l'opération d'emboutissage, on fait une comparaison entre la courbe numérique obtenue avec la simulation pour le modèle adapté, et la courbe expérimentale donnée par les travaux de Khelifa [Khe04]

##### Commentaire sur la courbe numérique :



**Figure IV.7 :** courbe numérique effort – déplacement du poinçon.

On voit qu'au début de l'emboutissage, l'effort augmente d'une manière linéaire. C'est la zone où l'effort se développe dans le domaine élastique du matériau, jusqu'à atteindre une valeur qui correspond au moment de plastification de la section de la tôle sur la matrice. Ensuite la courbe s'incurve brutalement. Le maximum de l'effort est atteint pour un déplacement du poinçon environ de 7.93mm. L'effort de poinçon décroît ensuite jusqu'à une faible valeur presque constant, avant que le poinçon n'atteigne la fin de course. A partir de ce point la partie emboutie de l'éprouvette est endommagée. Les zones concernées sont montrées par la figure IV.8, qui nous montre la distribution de la variable d'endommagement et de la contrainte équivalente, à chaque déplacement donné du poinçon.

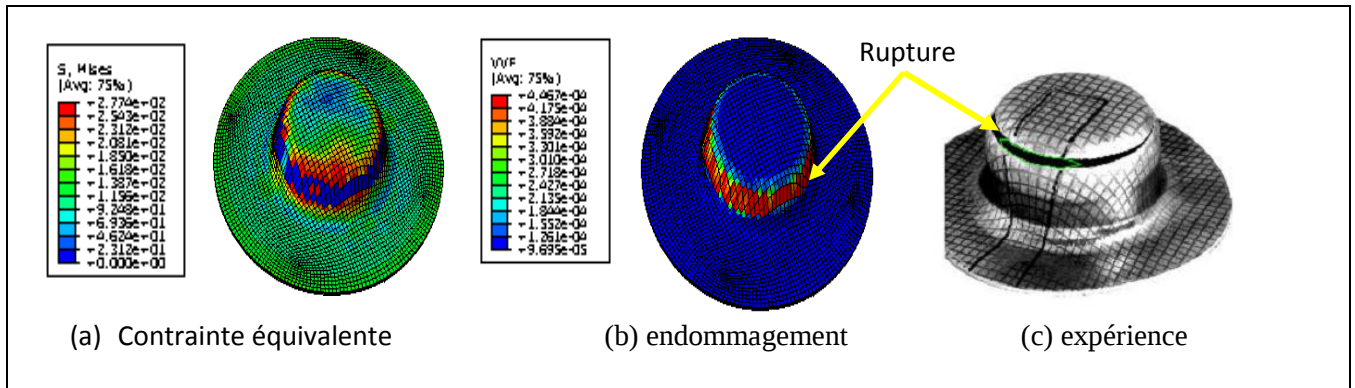


**Figure IV.8 :** Isovaleurs de la contrainte équivalente et l'endommagement pour certains déplacements du poinçon (Al)

On observe un début de localisation à un déplacement du poinçon  $u=2.5\text{mm}$ . La localisation apparaît sur une zone circulaire épousant la du poinçon. au fur et à mesure que le déplacement du poinçon augmente les valeurs de l'endommagement augmente dans la zone circulaire avec un diamètre décroissant. Une fois la localisation est

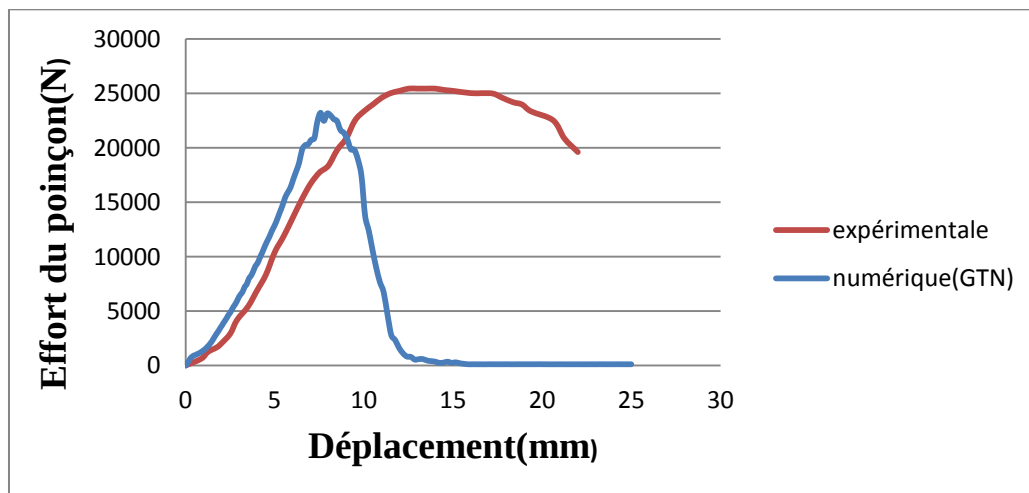
enregistrée à un déplacement  $u=5\text{mm}$  qui se transforme rapidement en une fissure macroscopique pour  $u=7.12\text{mm}$ .

La figure suivante montre la comparaison entre la rupture expérimentale et celle prédite par le modèle de (GTN)



**Figure IV.9 :** Initiation de la rupture sur l'embouti (Al)

La figure IV.9 présente la comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques en termes de l'effort-déplacement du poinçon.



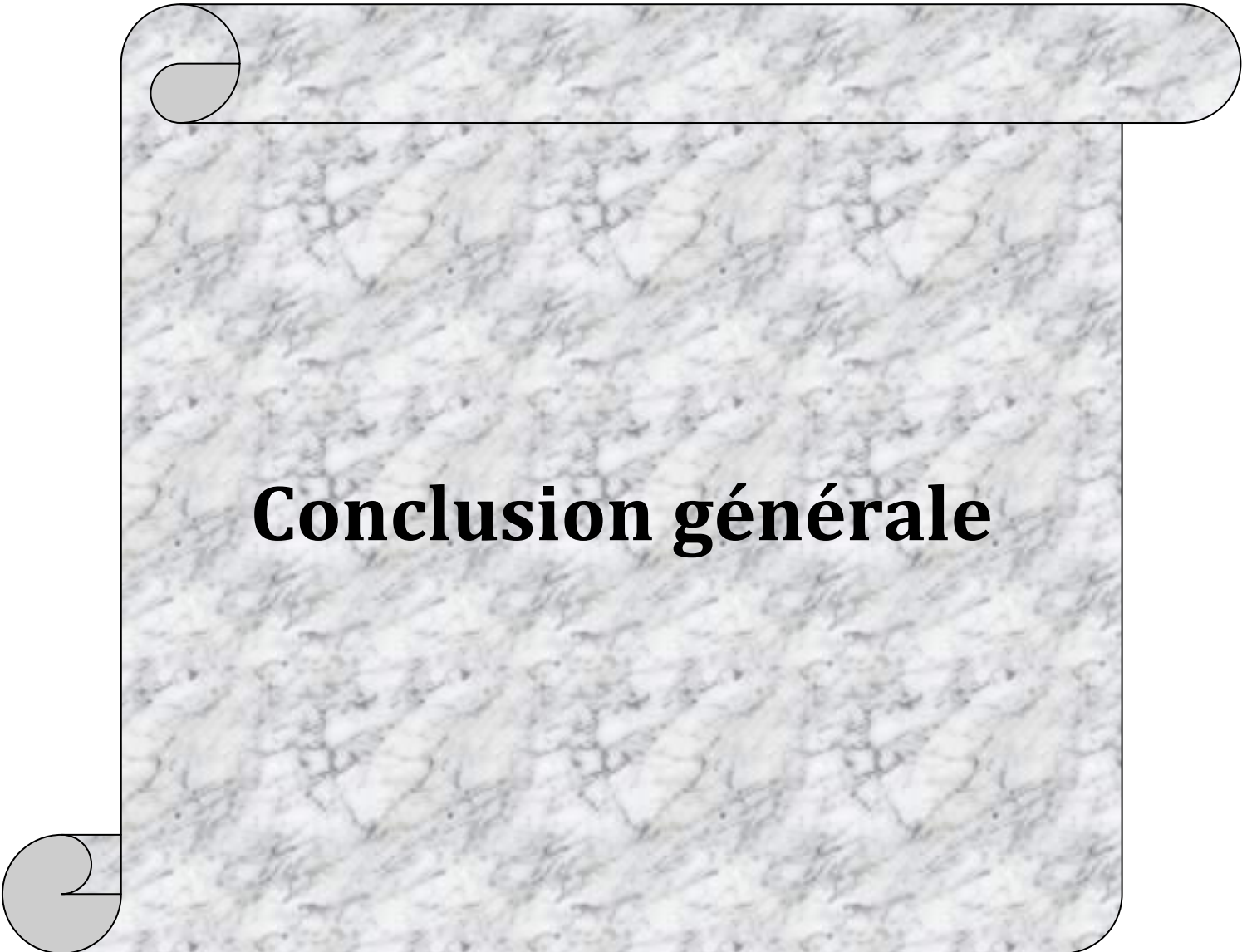
**Figure IV.10 :** Superposition de la courbe expérimentale et numérique de l'essai d'emboutissage

L'effort maximal obtenu par le modèle numérique (GTN) ( $F=23222.7\text{ N}$ ) est plus proche de l'expérience ( $F=25000\text{ N}$ ).

L'évolution de la courbe numérique effort - déplacement est fidèle à celle de l'expérimentale jusqu'à atteindre un déplacement du poinçon égale 7.93mm, mais à partir de cette valeur on observe un décalage important qui est due à un mauvais étalonnage des valeurs de  $f_c$  et  $f_f$ . En plus il faudrait tenir compte du fait que l'aluminium reste un matériau anisotrope et le modèle de Gurson suppose que le matériau est isotrope. Donc pour une évaluation de la courbe d'emboutissage à partir de l'essai de Gurson, il faudrait lui associé un critère supplémentaire qui va tenir compte de l'anisotropie de la déformation.

#### **IV. 6 Conclusion :**

Le test homogène que nous avons présenté au début de ce chapitre, nous a permis de déterminer les paramètres nécessaires, pour entamer la simulation numérique de procédé de d'emboutissage, avec le modèles (GTN). Les résultats de la simulation numérique présentée au cours de ce chapitre est très proches de l'expérimentale, alors on peut dire que ; le modèle choisis pour simuler le procédé d'emboutissage, est bons, et à travers cette simulation on peut prévoir les conditions de travail de ce procédé de mise en forme.

The background of the page is a light-colored marbled paper with a complex, swirling pattern of grey, white, and beige. There are two decorative scroll-like elements: one in the top-left corner and one in the bottom-left corner, both rendered in a solid grey color. The text is centered on the page.

# **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

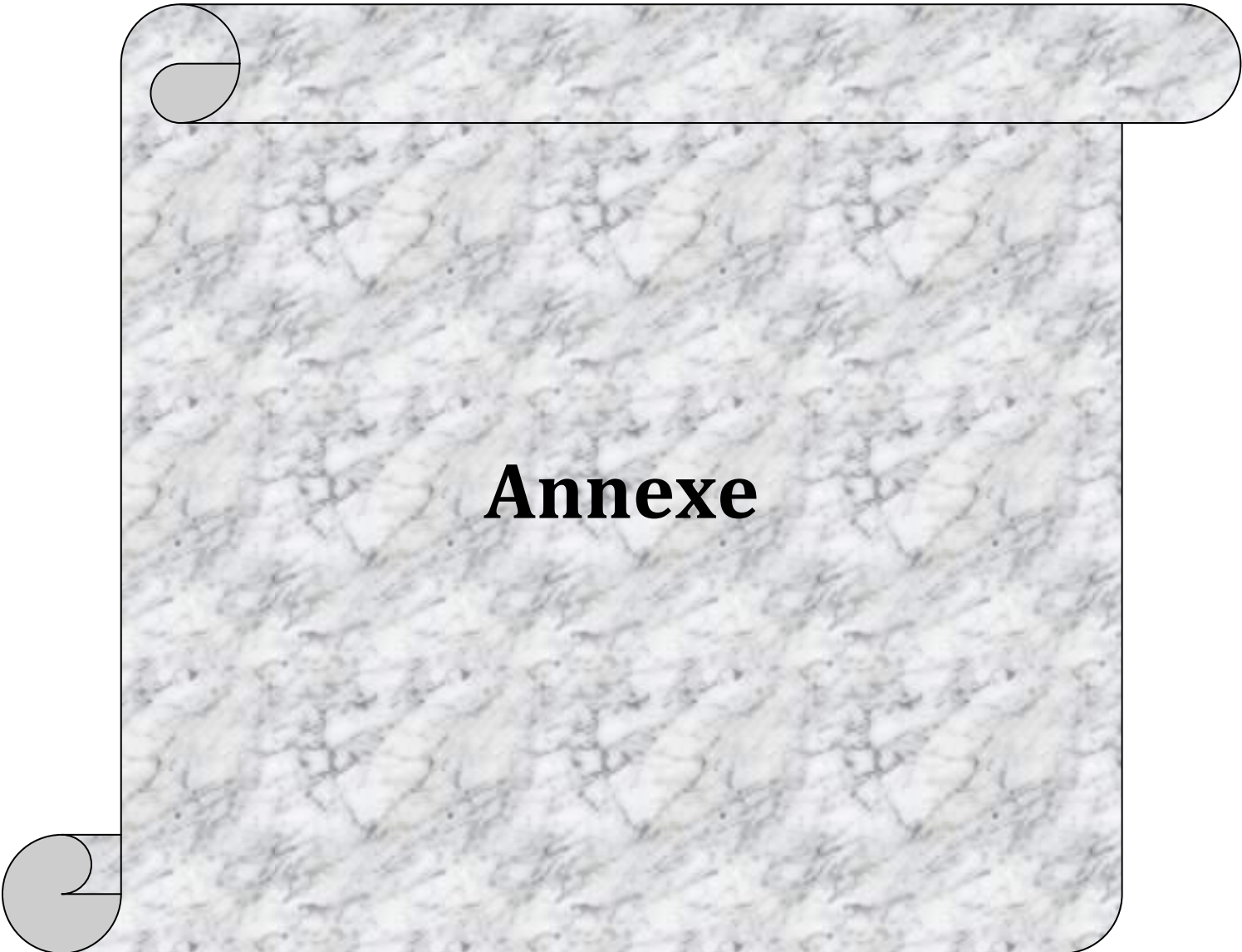
---

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire, a permis de mesurer l'importance de la modélisation et de la simulation numérique, en particulier, dans le domaine pratique de l'optimisation de formation des pièces, tout en veillant à minimiser les dommages et les pertes économiques, pendant l'opération de mise en forme.

L'objectif principal de ce travail était la mise au point d'une méthodologie numérique de prévision de la rupture ductile dans les tôles minces obtenu par grandes déformation plastique. Pour cela, nous avons tenté de faire et de présenter la simulation numérique avec ABAQUS, en utilisant le modèle de Gurçon (GTN), qui décrit le comportement du matériau lors de sa mise en forme.

A la lumière des résultats obtenus avec ces lois, nous relevons la bonne corrélation des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux. Cependant pour une meilleure simulation de l'essai d'emboutissage de tôle il faut tenir compte de l'anisotropie du matériau

J'espère que la méthodologie et les paramètres étudiés, s'avèreront d'une utilité pertinente pour la conception des pièces a partir des tôles minces, a travers le procédé de mise en forme par emboutissage. Et que la simulation numérique sera un bon exemple d'aide à la décision au niveau des entreprises de fabrication de pièces.

The image shows a rectangular area with a marbled paper texture, featuring swirling patterns of light beige, grey, and white. This central area is framed by a white border. At the top-left and bottom-left corners of the marbled area, there are decorative grey tabs that resemble folded paper or binder rings. The word "Annexe" is centered within the marbled area.

# **Annexe**

### Introduction :

L'objectif de cette annexe, est de savoir quelle sont les étapes ou les procédures à suivre, pour réaliser un essai d'emboutissage sur le logiciel de simulation ABAQUS.

Le système qu'on veut créer se décompose en deux parties :

1. Eprouvette circulaire: Corps déformable.
2. Matrice, serre-flan et poinçon : Corps rigides.

### Remarque sur les touches de la souris :

La souris comporte trois touches, classiquement appelées M1, M2 et M3, de gauche à droite. Chacune à un mode de fonctionnement particulier dans ABAQUS/CAE : la touche M1 sert à sélectionner (classique), la touche M2 sert en général à confirmer pour quitter une action : elle peut être une alternative pratique pour répondre "OK" à une question. Cliquer sur M2 revient dans la plupart du temps à valider une action, ou à quitter une procédure, la touche M3 permet de faire apparaître des menus contextuels, relatifs à l'action en cours, elle permet bien souvent de faire un pas en arrière dans l'action entreprise.

### I. Création de l'objet :

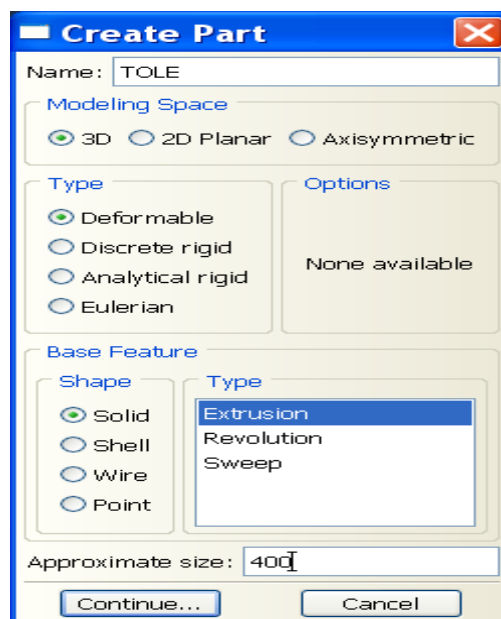
Dans ABAQUS, pour créer un objet 3D, il est nécessaire de créer tout d'abord le profil de l'objet. Ensuite ce profil générera l'objet en 3D par extrusion, révolution ou balayage (on crée un profil puis un chemin sur lequel propager ce profil).

Dans le module **Part** créer les deux parties en allant dans le menu **Part>create** (ou en

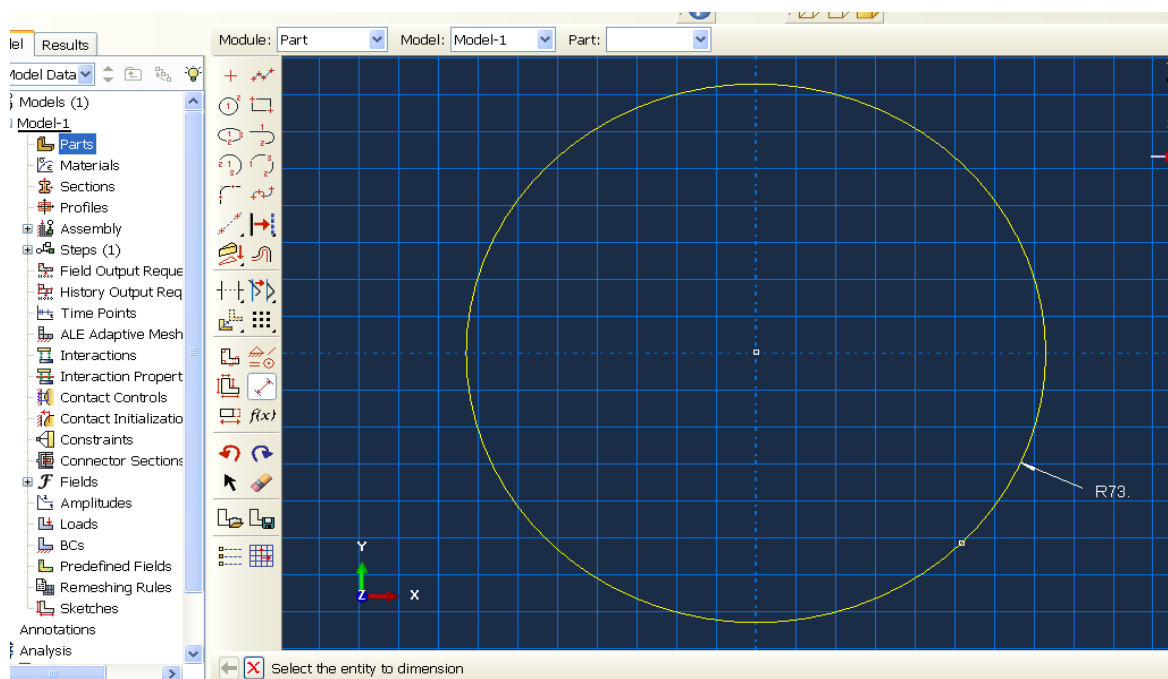
cliquant sur )

#### ➤ Pour l'éprouvette :

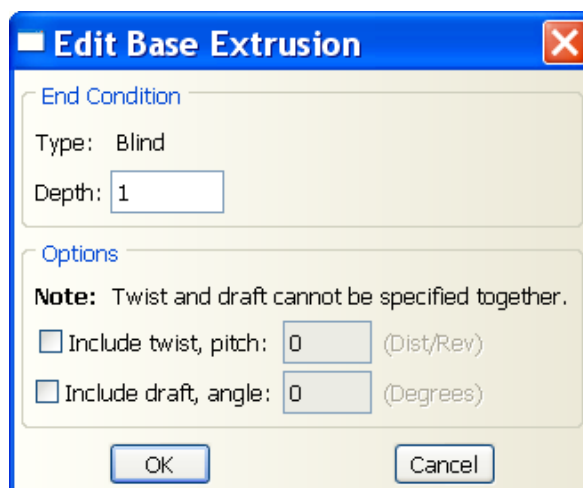
Cliquez sur **Part>create**, et comme **Type** sélectionnez **deformable**, comme suit :



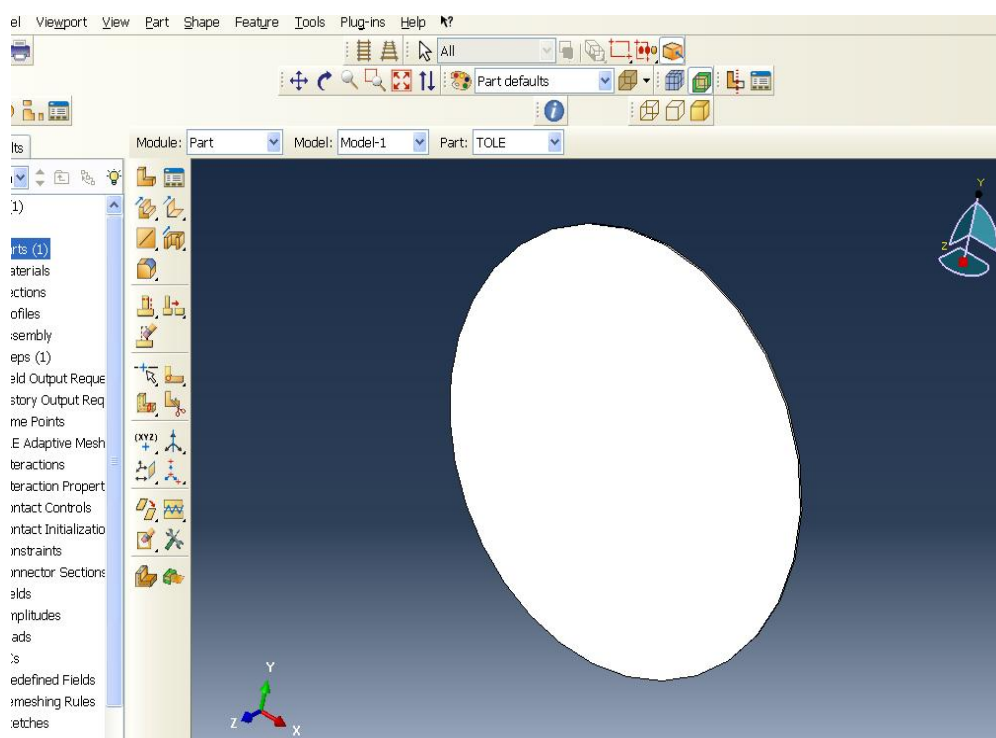
Cliquez sur **Continue** pour dessiner l'éprouvette :



Lorsque le profil est bon, appuyez sur **Done** pour faire apparaître la boîte de dialogue **Edit Base Extrusion**, qui permet de donner les caractéristiques de l'extrusion. Dans le champ **Depth** (profondeur) entrez 1 :



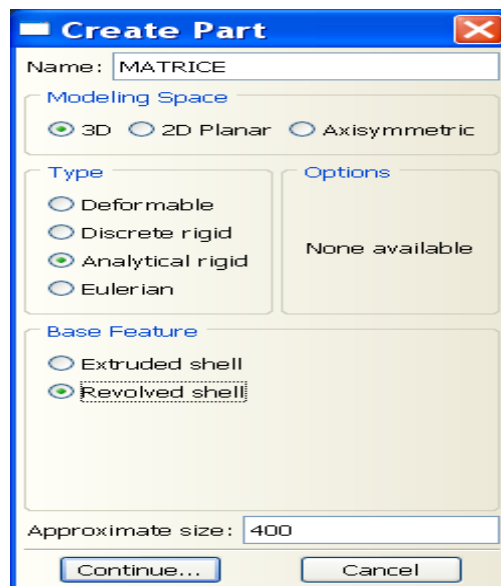
En suit cliquez sur **OK**, pour avoir la forme finale comme suit



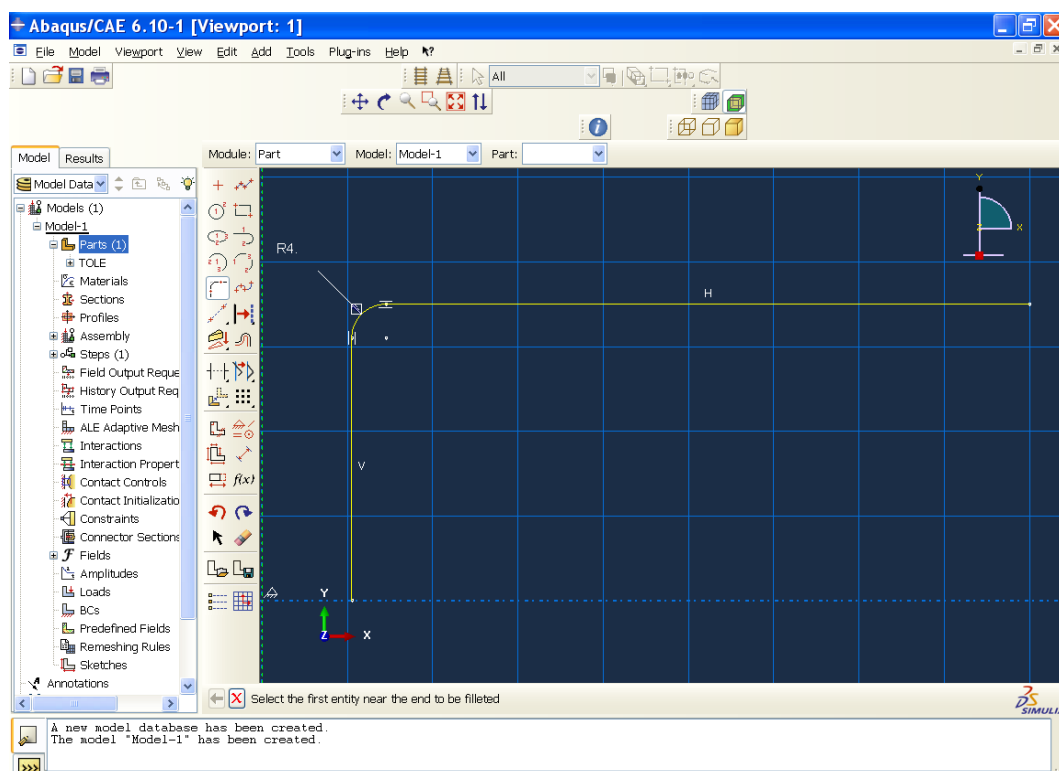
On passe maintenant à créer les corps rigides :

## 1. La matrice :

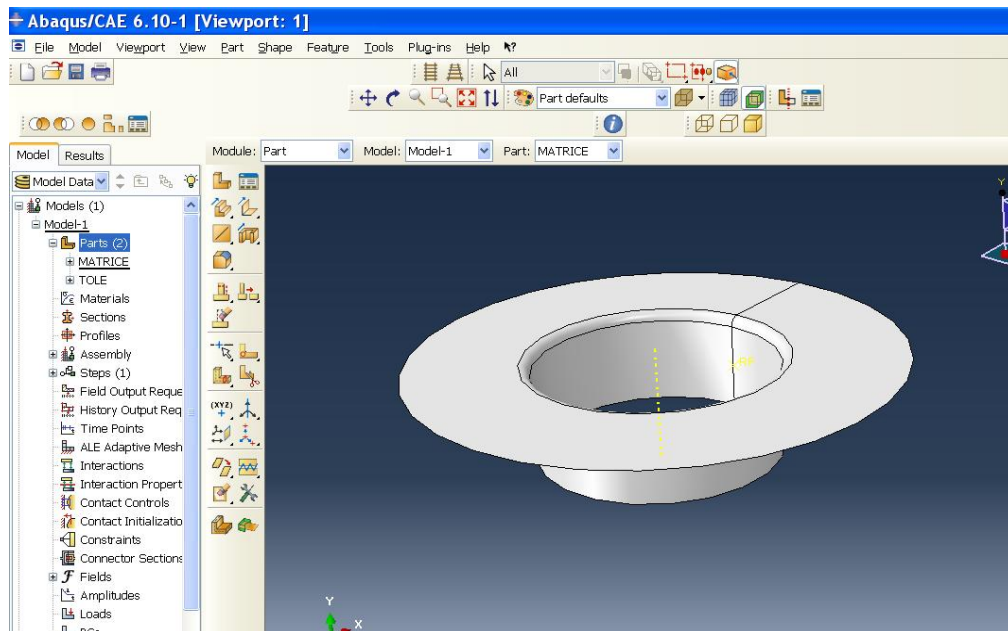
Cliquez sur **Part>create** comme l'étape précédente, et comme **Type** sélectionnez **Analytical rigid**, comme suit :



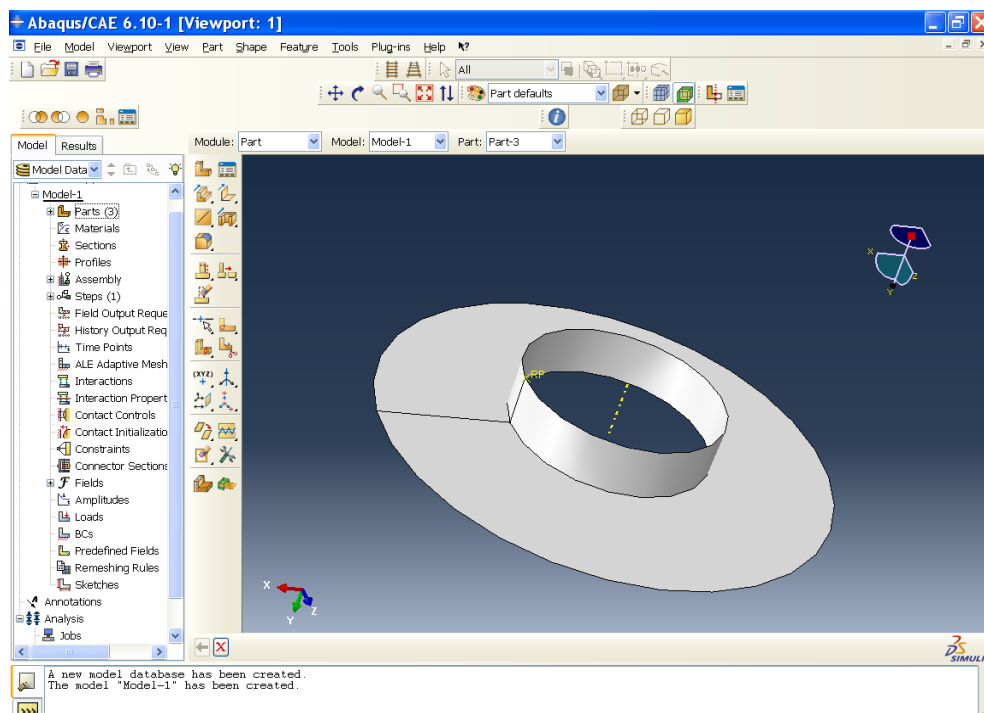
Appuyez sur **Continue** pour dessiner la matrice comme suit



Cliquez sur **Done** pour avoir la forme finale comme suit :

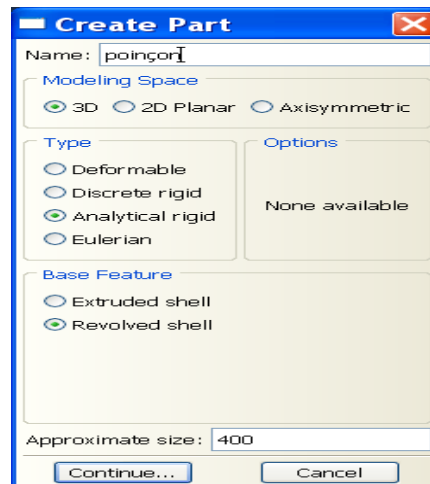


De la même façon créez serre-flan, leur forme finale est comme suit :

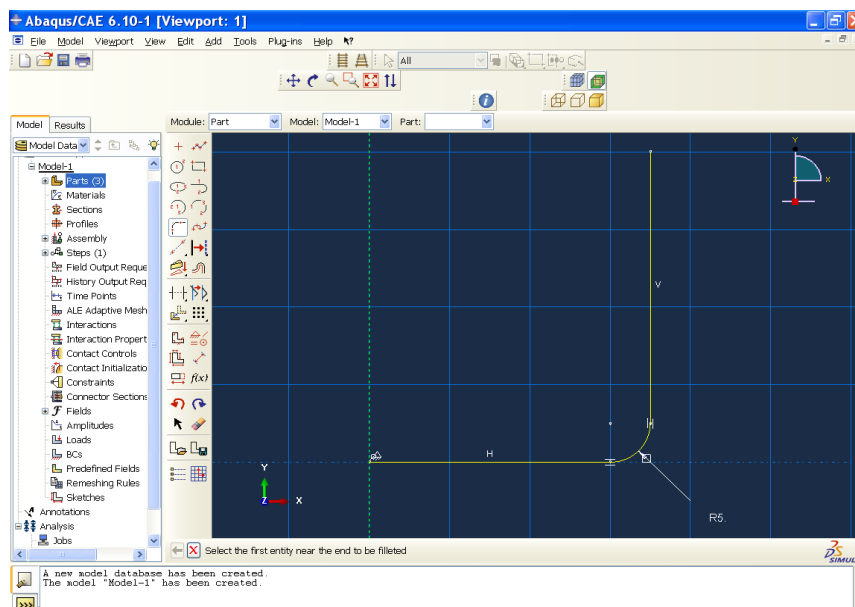


## Le poinçon :

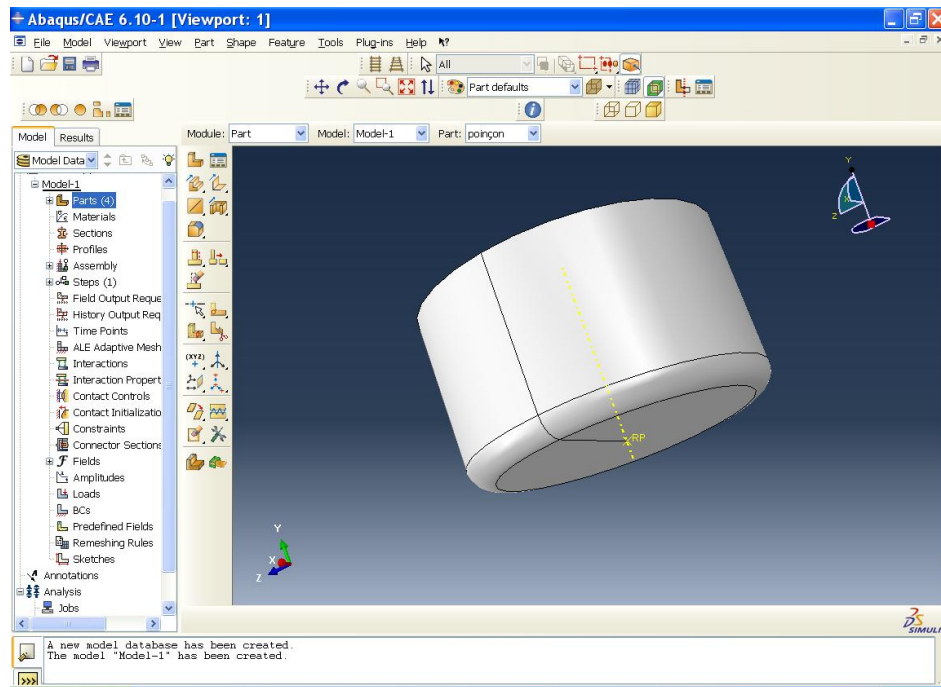
Cliquez sur **Part>create** comme l'étape précédente, et comme **Type** sélectionnez **Analytical rigid**, comme suit :



Appuyez sur **Continue** pour dessiner le poinçon comme suit



Cliquez sur **Done** pour avoir la forme finale comme suit :

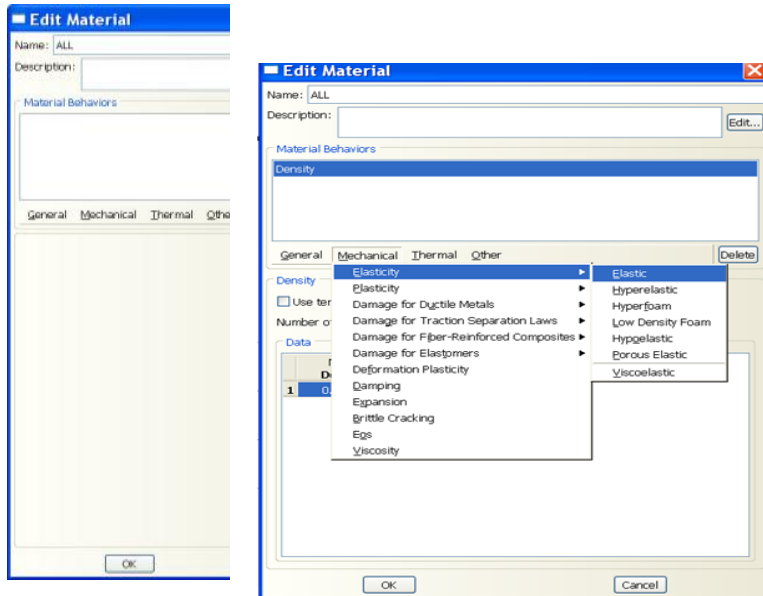


Lorsque nous créons une surface rigide, il est nécessaire de créer un point de référence, sur lequel seront appliqués tous les chargements qu'on veut créer. Nous allons choisir le point de référence : Allez dans **Tools > Reference Point** et sélectionnez le point adéquat sur chaque objet rigide.

## II. Créer un matériau :

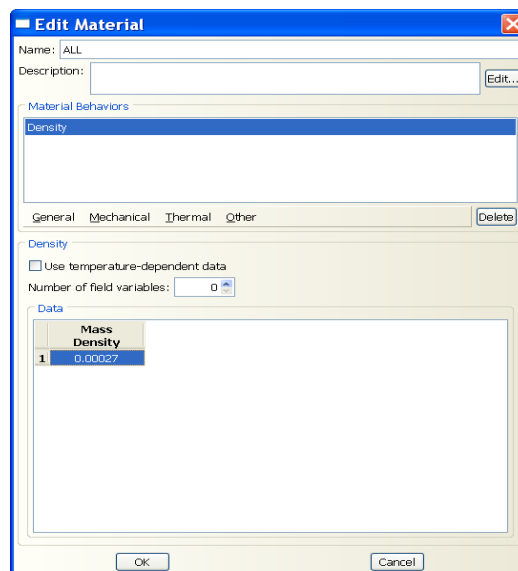
Après avoir créé notre éprouvette, il faut définir le matériau dont est faite cette pièce. Dans ABAQUS, il n'existe pas de base de données de matériau, il faut donc créer nos matériaux nous même. Dans notre cas nous voulons que notre éprouvette soit en aluminium.

1. Double cliques sur **Materials**, pour ouvrir **Edit Material**. Nommez le matériau ALL

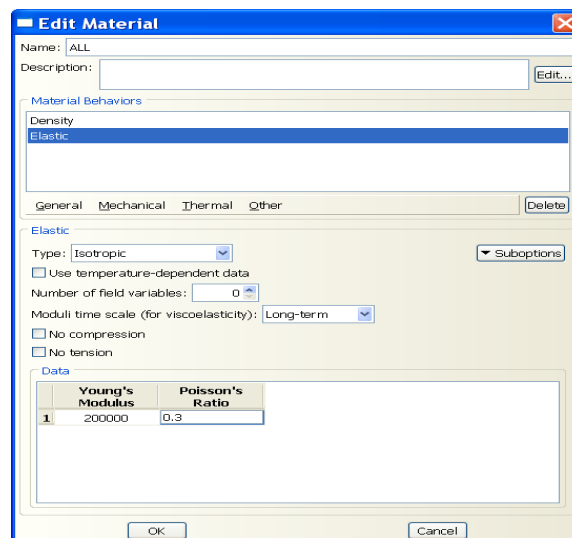


Ensuite, il va falloir donner les caractéristiques de notre matériau. Vous pouvez regarder toutes les caractéristiques que nous pouvons donner. Dans notre exemple, on a choisis les caractéristiques suivantes:

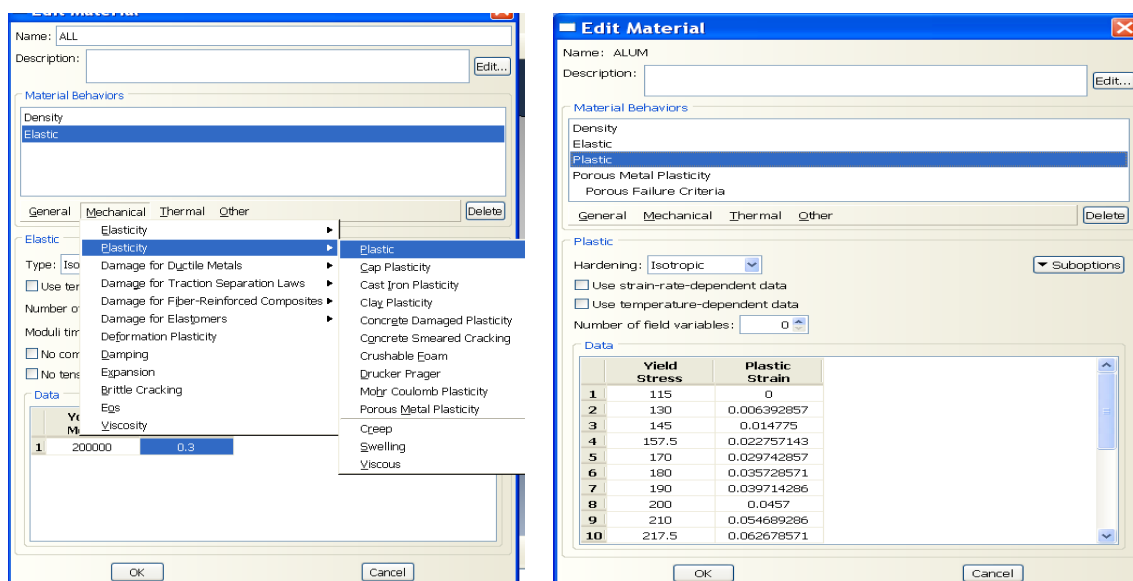
- ✓ Cliquer sur **General** et validez : **Density**, puis entrez sa valeur :



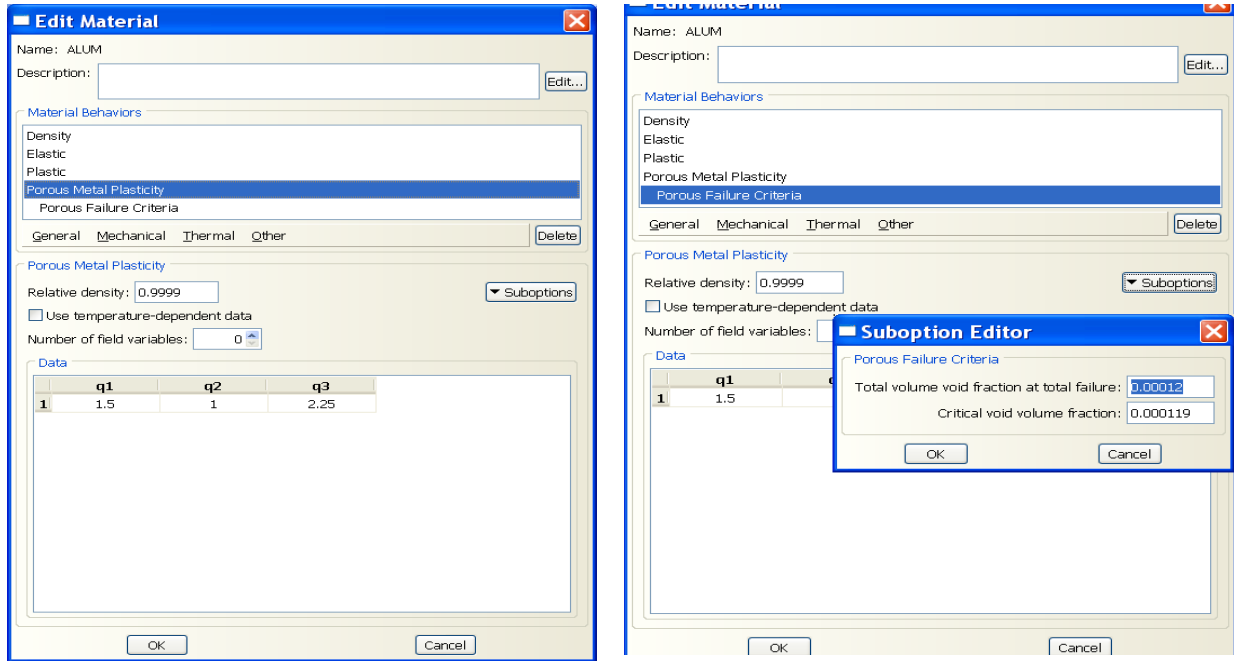
- ✓ **Machanical,elasticity,elastic** puis entrez sa valeur comme suit :



✓ **Machanical,plasticity,plastic** puis entrez sa valeur comme suit :



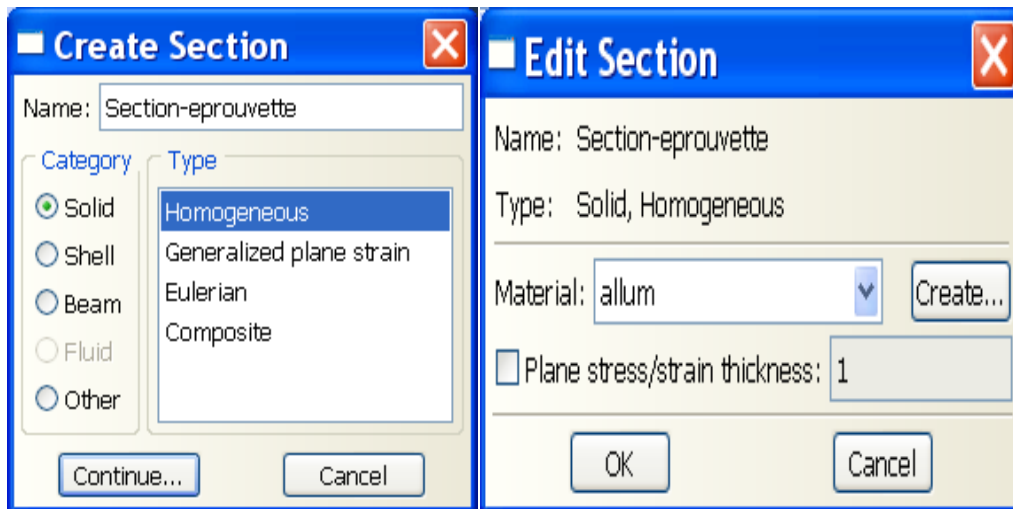
Puis on saisie les paramètres de notre model comme suit :



### III. Définir et affecter les propriétés de section :

Les propriétés des objets (**Parts**) sont définies à travers des sections. Un objet peut comporter une ou plusieurs sections qui vont définir le matériau affecté au solide. Nous allons créer une section homogène solide, pour l'affecter à notre éprouvette. Cette section contiendra une référence au matériau que nous avons créé.

1. Double cliques sur **Sections** dans l'arbre afin de créer une section.
2. Dans la boîte de dialogue **Create Section**, nommez la section : Section Eprouvette. Elle devra être de catégorie **solide** et de type **homogène** (ceci étant les paramètres par défaut, vous n'avez qu'à appuyer sur **Continue**).
3. Dans la fenêtre qui s'ouvre alors, sélectionnez **allum** comme matériau et acceptez la valeur 1 pour **Plane stress/strain thickness**. Cliquez sur **OK** pour valider.

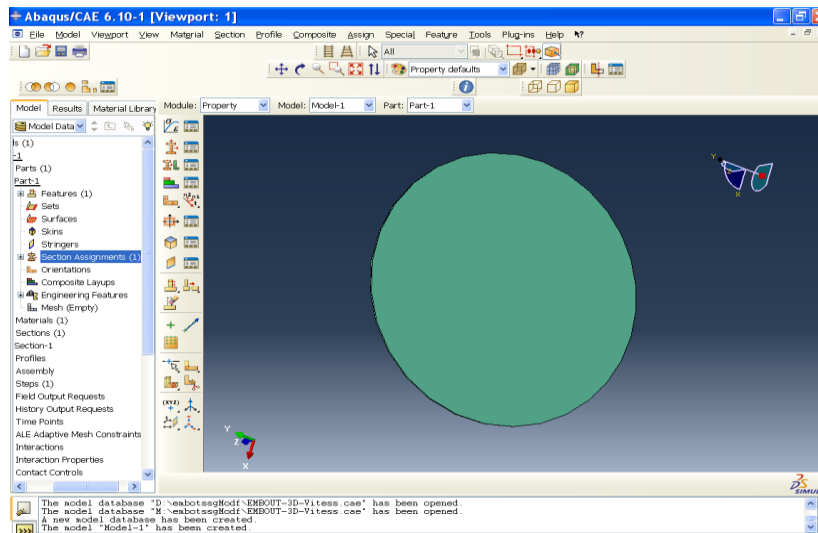


4. Ensuite, il faut affecter la section à notre éprouvette. Pour cela, dans l'arbre ouvrez l'arborescence du **Part** en cliquant sur « + » puis celle de l'Eprouvette. Double-cliquez sur **Section Assignment**. Des instructions sont alors données dans la bande de dialogue. Sélectionnez l'éprouvette en cliquant sur n'importe quelle partie de sa surface.

Validez votre choix (**M2** ou **Done**).

5. La boîte de dialogue **Edit Section Assignment** s'ouvre alors, choisissez **Section Eprouvette** puis acceptez (**OK**) et fermez la boîte de dialogue.

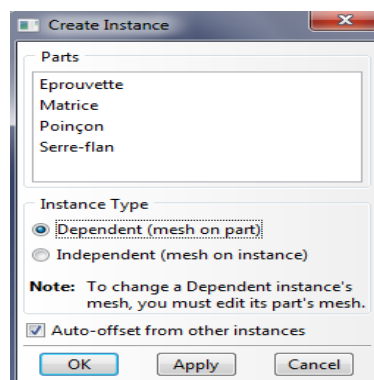
Lorsque vous avez affecté une section à un objet, ABAQUS colorie l'objet en vert pour signifier qu'il est défini. De plus, le matériau défini dans la section est affecté à l'objet.



## IV. Assembler le modèle :

Notre prochaine tâche, consistera à créer et assembler les instances de nos objets. Une instance peut être considérée comme une représentation dans un repère global de nos objets. De plus un assemblage peut être constitué de plusieurs instances d'un même objet, comme par exemple des rivets sur une structure.

1. Tout d'abord il nous faut créer nos instances. Double cliques sur **Instances** dans l'arborescence **Assembly**. Sélectionnez **TOLE** puis **Apply**. La nouvelle instance se nomme **TOLE** pour indiquer que ceci est la première instance de cet objet.
2. Ensuite cochez la case **Auto-offset from other instances** pour indiquer que l'instance créée ne doit pas être placée sur la précédente mais à côté et créez les instances **matrice**, **poinçon** et **serre-flan**.



Une fois que les instances sont créées, il est judicieux de les placer correctement pour faciliter la visualisation de l'ensemble. Pour cela il est nécessaire de savoir qu'ABAQUS possède les outils de translation et de rotation des pièces, des outils qui

permettent de positionner une instance mobiles par rapport à une instance fixe (ces instances seront choisies lors de l'utilisation des outils), ces outils sont disponibles dans **Constraints** qui contient :

**Parallel Face** : L'instance mobile va bouger jusqu'à ce que les deux faces choisies soient parallèles.

**Face to Face** : De même que **Parallel Face** avec une notion de distance entre les faces.

**Parallel Edge** : Arrêtes parallèles.

**Edge to Edge** : Arrêtes colinéaires ou ayant une certaine distance entre elles.

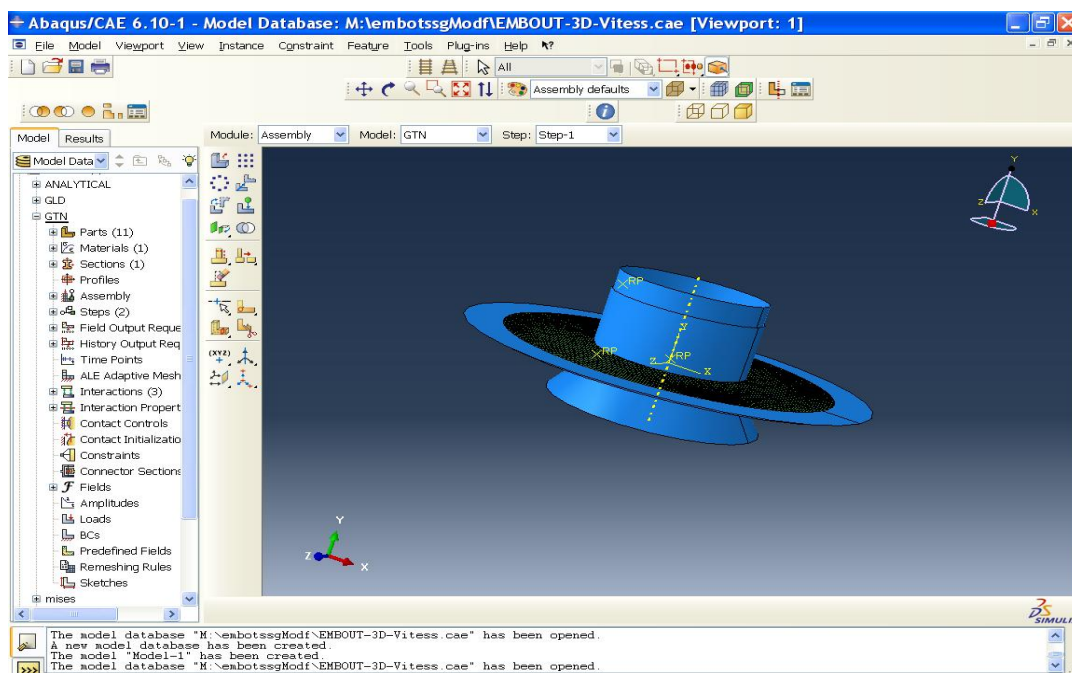
**Coaxial** : L'instance mobile bouge jusqu'à ce que les deux faces choisies soient coaxiales.

**Coincident Point** : 2 points coïncidents.

**Parallel CSYS** : L'instance mobile bouge jusqu'à ce que les deux systèmes de coordonnées soient parallèles.

**Contact** : L'instance mobile bouge dans une certaine direction jusqu'à ce que les deux faces choisies soient à une distance prédéfinies l'une de l'autre.

L'assemblage des objets créés est donné par l'image suivante :

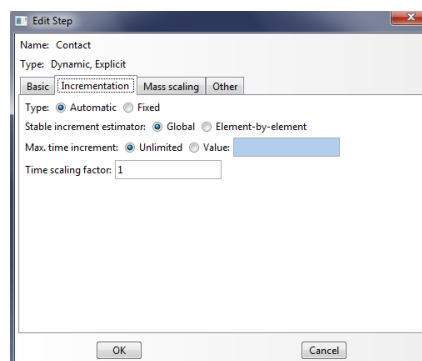


### V. Définir les pas d'analyse

Avant d'appliquer les conditions aux limites et les chargements du modèle, il est nécessaire de définir les différents pas d'analyse du modèle. Ici nous voulons 2 pas d'analyse :

- un pas initial, où seront appliquées les conditions limites et définir les contacts entre les instances.
- un pas général, dans lequel seront appliqués les chargements et modifier les conditions limites.

1. Ouvrez la boîte de dialogue **Create Step** (double cliquez sur **Steps**), nommez votre pas : **Contact** de type **Dynamic Explicit, General**. Continuez, puis dans l'éditeur de pas, décrivez-le comme **Etablissement du contact**.
2. Dans la table **Incrementation**, mettez la valeur 1 dans le champ initial.
3. Avec la même technique créez le pas Chargement.



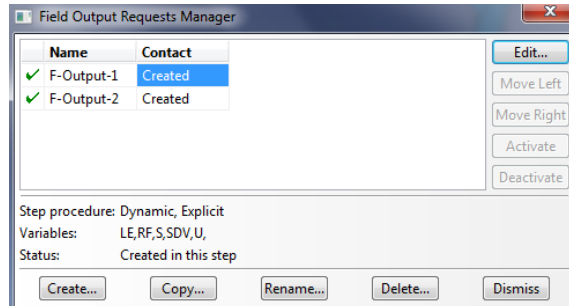
Lorsque l'on crée des pas d'analyse, ABAQUS inclut par défaut pour analyse les variables suivantes :

- S (Stress)
- PE (Plastic strain components)
- PEEQ (Equivalent plastic strain)
- PEMAG (Plastic strain magnitude)
- LE (Logarithmic strain components)
- U (Translations and rotations)
- RF (Reaction forces and moments)
- CF (Concentrated forces and moments)
- CSTRESS (Contact stresses)

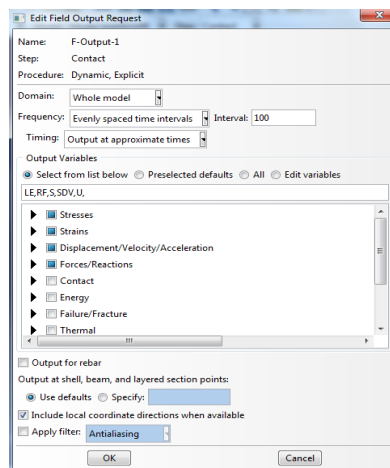
- CDISP (Contact Displacements)

Maintenant nous voulons modifier ces variables :

1. Dans l'arbre, faites M3 sur Field **Output Requests** et choisissez **Manager** dans le menu. Dans le pas de Chargement, sélectionnez **F-Output-1** et éditez le (**Edit**). Vous entrez alors dans l'**Edit Field Output Request**.



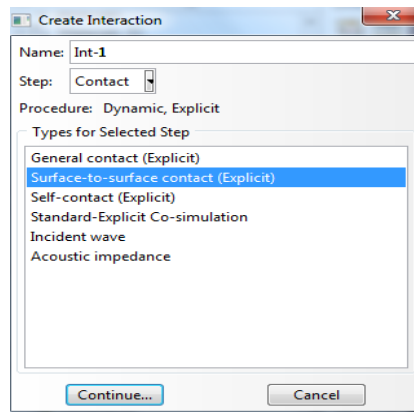
2. Allez dans les Contact, pour modifier les requêtes de sortie.



## VI. Définition des interactions :

Dans le module **Interaction**, allez dans le menu **Interaction** > **Créate** et créer une condition de contact **surface to surface** entre l'éprouvette et :

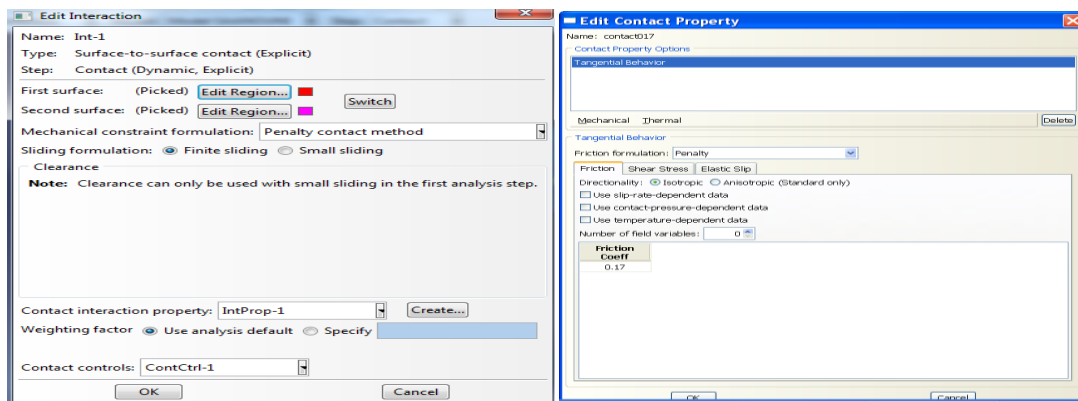
- ✓ **La matrice ;**
- ✓ **Le serre-flan ;**
- ✓ **Le poinçon.**



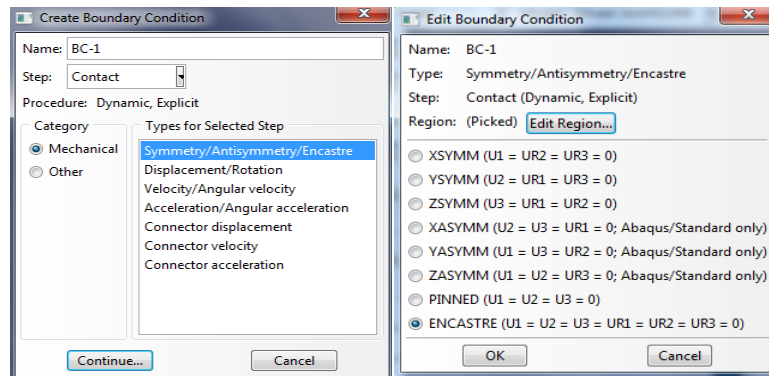
Cliquez sur continue, dans la fenêtre **Edit interaction** sélectionnez **Penalty contact method** dans **Mechanical constraint formulation**, pour définir les frottements entre les surfaces en contact. Pour cela cliquez sur **Create** dans **Contact interaction property**, la fenêtre **Edit contact property** va apparaître, dans **Mechanical** sélectionnez **Tangential Behavior** et dans **Friction formulation** sélectionnez **Penalty** et entrez la valeur 0.15 dans **Friction coeff**.

## Remarque :

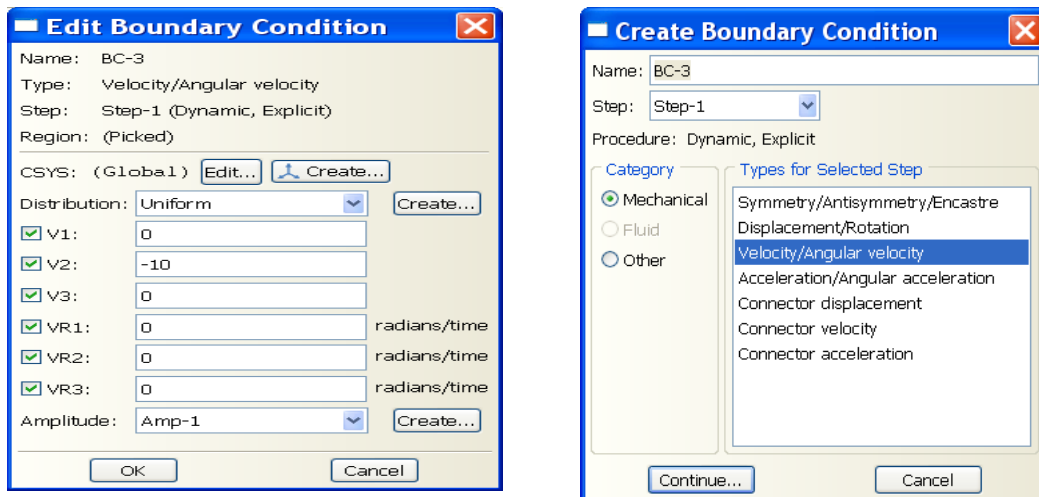
Le coefficient de frottement entre le poinçon et l'éprouvette est de 0.09.



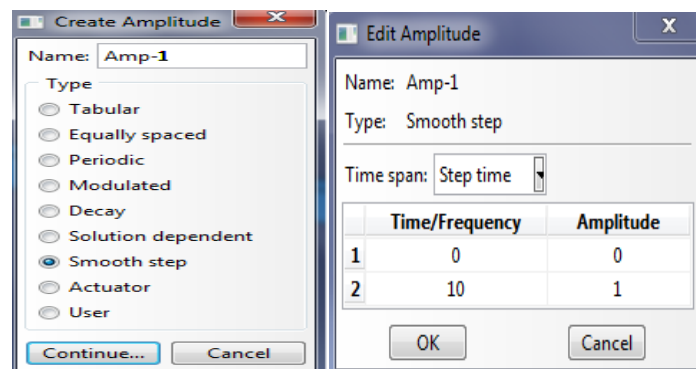
1. Dans l'arbre, faites **M3** sur **BCs** et sélectionnez **Manager**. Créez une nouvelle condition limite. Nommez la **Fixe1**.
2. Sélectionnez comme type **Symmetry/Antisymmetry/Encastre** de condition limite. **Continue**. Sélectionnez le point de référence de la matrice. Cliquez sur **Done**. La fenêtre **Edit Boundary Condition** s'ouvre. Cochez **Encastre**. Faites de même pour le serre-flan.



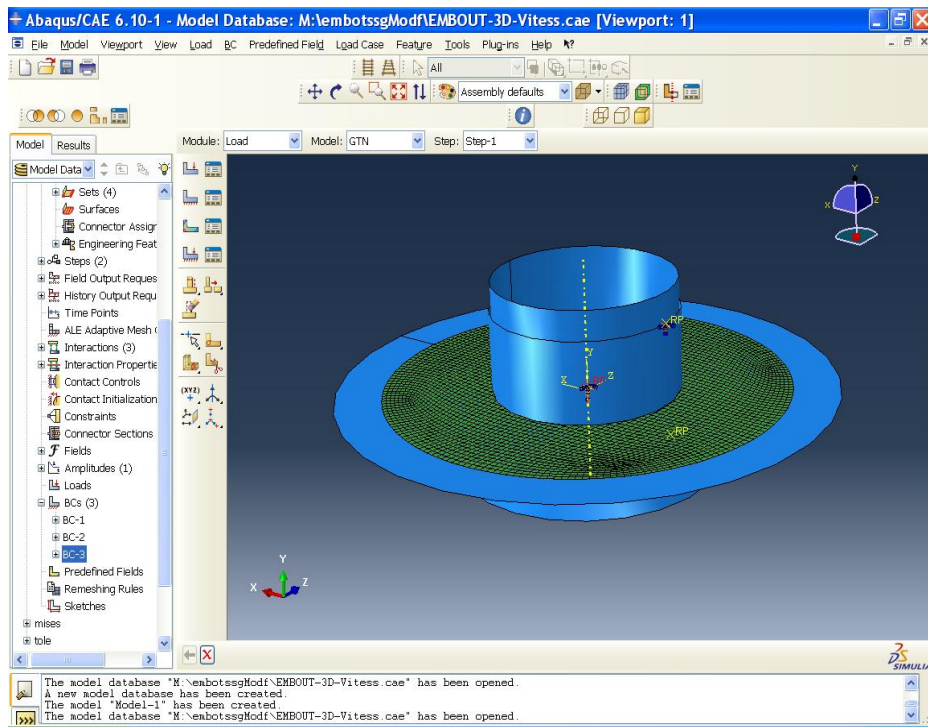
2. pour la troisième condition répétez l'étape 1, et pour l'étape2 sélectionnez comme type velocity/angular velocity cceptez la distribution **Uniform**, puis faites entrez les valeurs comme suit :



Pour **Amplitude**, cliquez sur **Create** pour créer une amplitude de type **Smooth step**.



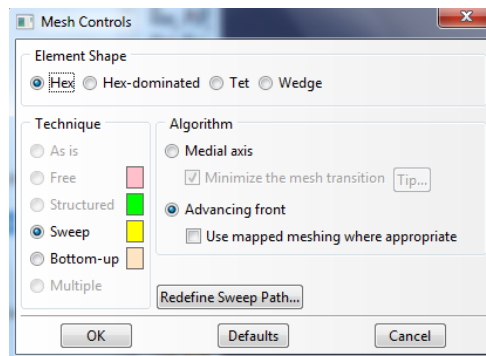
3. Les conditions aux limites créées sont comme suit:



## VIII. Maillage:

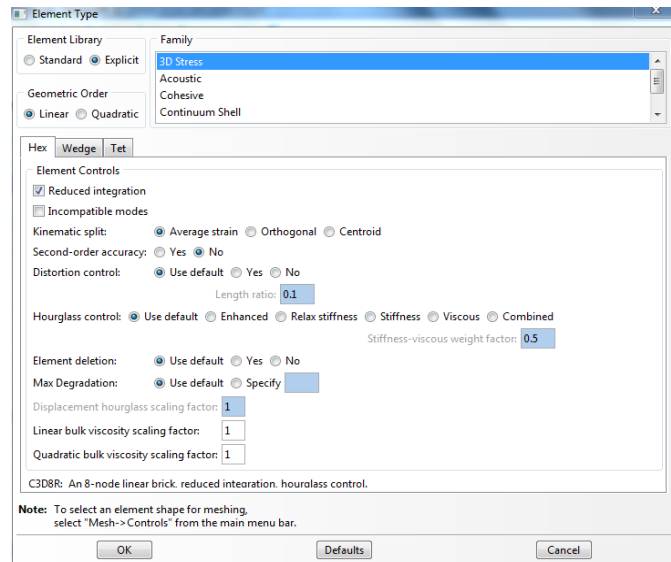
Tout d'abord nous allons choisir la technique de maillage :

1. Dans le modèle sous **Parts**, **tole**, double cliques sur **Mesh** pour atteindre le module de maillage. Dans la barre de menu, allez dans **Mesh>Controls**, sélectionnez la **tole**, cliquez sur **Done**. La fenêtre **Mesh Controls** apparait cochez **Hex**. Les couleurs permettent de voir quelle technique ABAQUS va utiliser pour mailler chaque région.



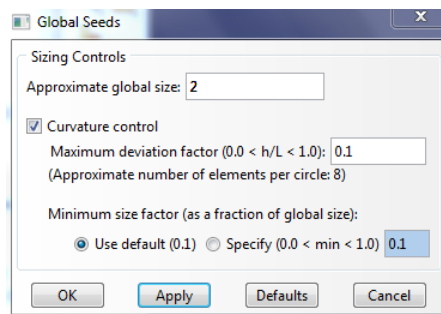
Cliquez sur **OK**.

Allez dans **Mesh>Element Type**, sélectionnez l'éprouvette, cliquez sur **Done**. La fenêtre **Element Type** apparaît. Dans **Element Library** sélectionnez **Explicit**. Pour **Geometric Order** cochez **linear**.



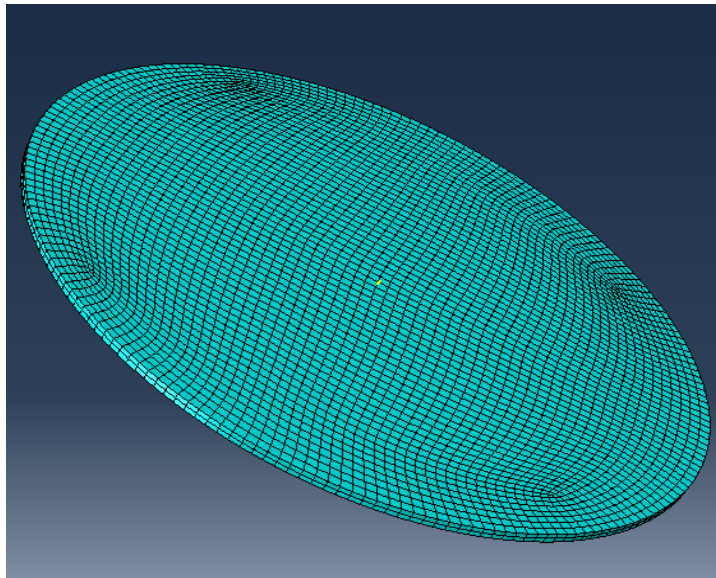
Cliquez sur **OK**.

Allez dans **Seed>Instance**, sélectionnez la toile, cliquez sur **Done**. La fenêtre **Global Seeds** apparaît. Dans **Approximate Global Size** entrez la valeur .



Cliquez sur **OK**.

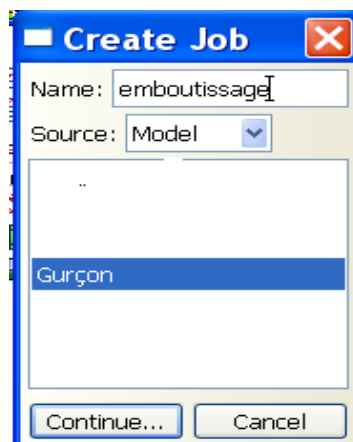
Allez dans **Mesh>Instance**, sélectionnez, cliquez sur **Done**.



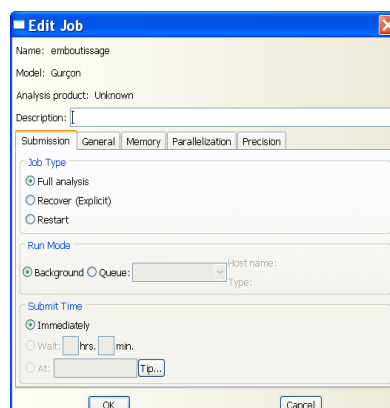
### XIII. Créer et soumettre un travail d'analyse

Une fois que toutes les analyses ont été créées il faut créer et soumettre le travail :

1. Double cliquez sur **Jobs** pour ouvrir la boîte de dialogue **Create Job** et créer un nouveau travail. Nommez **emboutissage**.



Ensuite Continue pour créer le travail. L'**Edit Job** apparaît alors, et dans Description, notez **Essai d'emboutissage**



Il est possible de choisir plusieurs paramètres et options pour le travail :

**Full Analysis** : Faire une analyse complète (option par défaut).

**Data Check** : Vérifier que le modèle est consistant.

**Continue Analysis** : Continuer le modèle après une vérification.

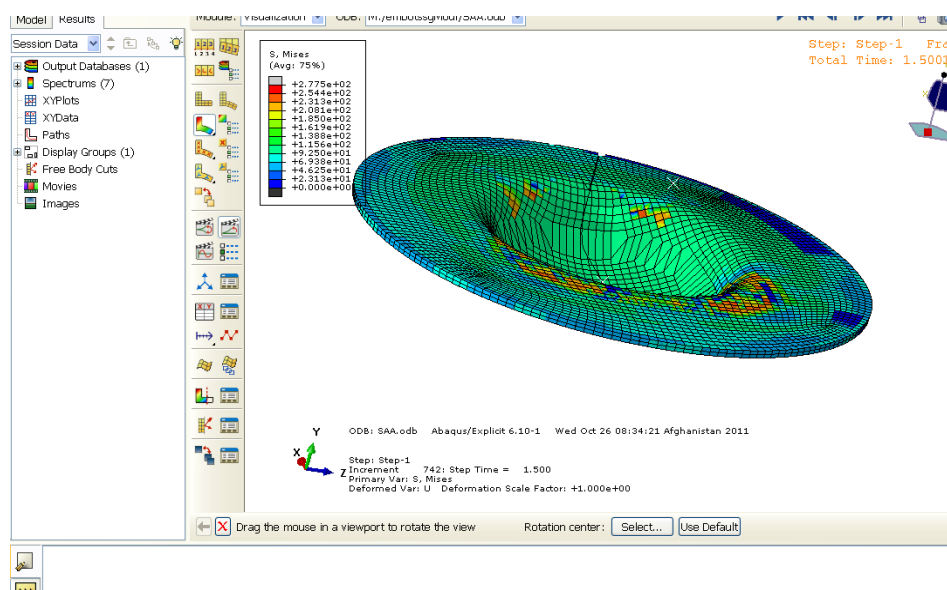
**Restart** : Lancer un job qui est la continuation d'une analyse précédente du modèle.

2. Cliquez **OK** pour valider.

3. Pour soumettre le travail, **M3** sur le nom du travail dans l'arbre puis **Submit**.

4. A la fin de l'analyse du modèle (ABAQUS marque **Completed** à côté du travail demandé), vous pouvez visualiser les résultats : M3 sur **pliage** puis **Results**. ABAQUS rentre alors dans le module de visualisation.

## XI. Visualiser les résultats de notre analyse :

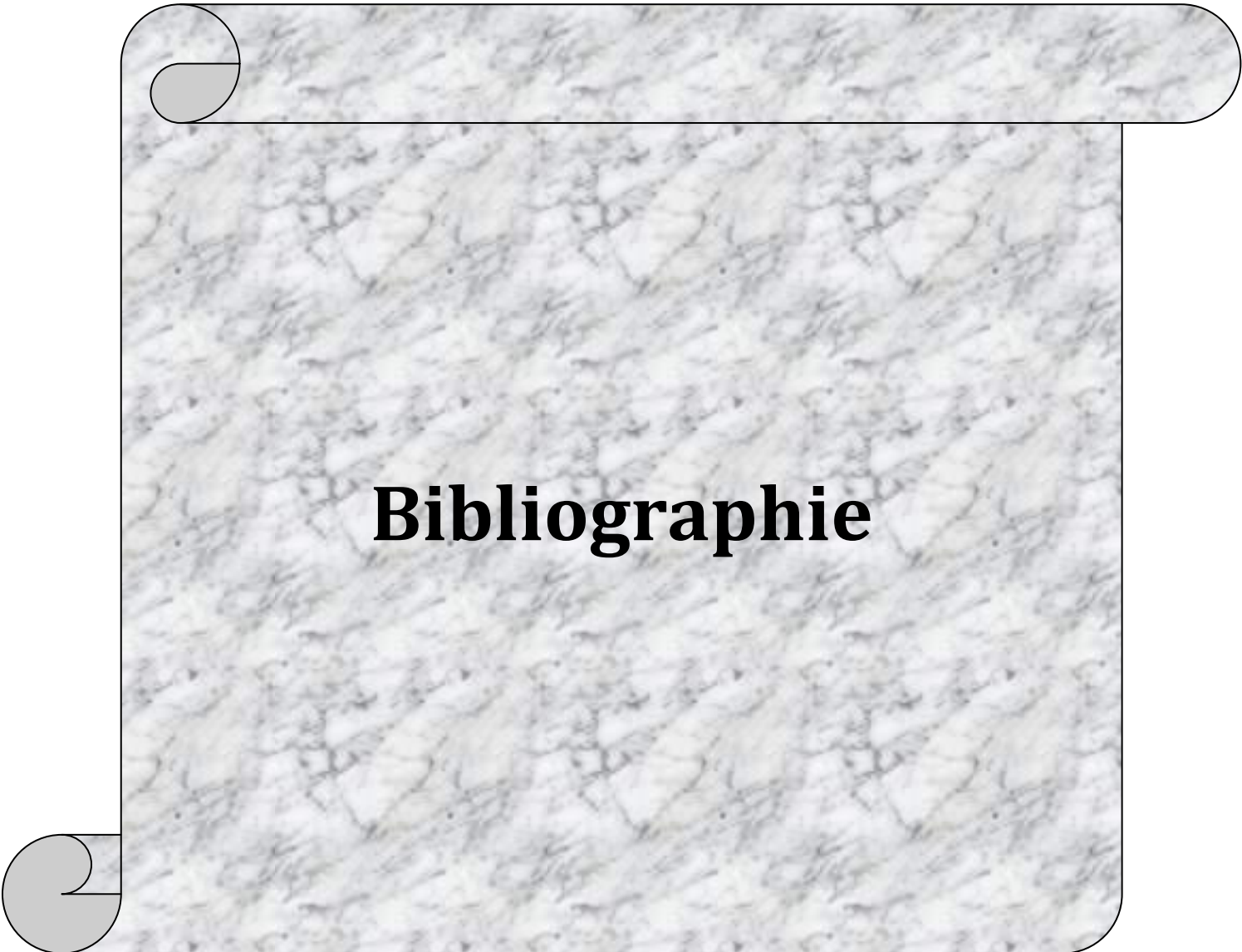


## Conclusion :

Pour conclure, voici un petit rappel des actions à effectuer pour créer un exemple sur ABAQUS :

1. Dessiner notre modèle :

- a. Dessiner le profil 2D de la forme voulue
  - b. Le développer en 3D
2. Affecter les propriétés à l'objet :
  - a. Créer le matériau
  - b. Créer les sections sur lesquelles appliquer les matériaux
  - c. Affecter les matériaux aux sections correspondantes
3. Assembler le modèle :
  - a. Créer les instances
  - b. Les positionner dans le repère général
4. Définir les pas d'analyse
5. Créer les interactions entre les instances :
  - a. Créer les surfaces
  - b. Définir les types de contacts
  - c. Associer des surfaces avec des types de contact
6. Appliquer les conditions limites et les chargements :
  - a. Définir les pas d'application
  - b. Définir les types de CL ou chargement
7. Mailler le modèle :
  - a. Choisir les techniques de maillage
  - b. Choisir les types de maille
  - c. Discrétiser le modèle
  - d. Mailler le modèle
8. Créer et soumettre un travail
9. Visualiser les résultats.



# **Bibliographie**

## *Références bibliographiques*

---

- [Bah2005] R. BAHLOUL Optimisation du procédé de pliage sur presses de pièces en tôles à haute limite d'élasticité. Thèse doctorat. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Angers 2005.
- [Ben2005] Ben Tahar M, Contribution à l'étude et la simulation du procédé d'hydroformage, Thèse de doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, Paris, 2005.
- [Col 2006] Col, A., 2006. Emboutissage des tôles : Importance des modes de déformation. Techniques de l'ingénieur. M 3 180.
- [Cun2000] Cunat J.P, "Aciers inoxydables - Mise en oeuvre", Technique de l'ingénieur, M 4 542 - 1 - 24, Septembre 2000.
- [Del 2002] A. Delamézière, Contribution à l'optimisation des paramètres du procédé d'emboutissage des tôles minces par l'approche inverse, Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 2002.
- [Gur77] GURSON A L: continuum theory of ductile rupture by void nucleation and Growth. Part I- Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. J Eng .Mat Vol 99.1977.
- [Had2006] Haddag, B.2006. Investigation of advanced strain-path dependent material models for sheet metal forming simulations. Int. J. of Plasticity, in press, 1-29.
- [Khe 2004] Khelifa, M., 2004. Simulation numérique de l'endommagement en formage des structures minces. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes.
- [Mai91] A. MAILLARD. Etude expérimentale et théorique du découpage. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1991
- [Mariage2003] J. F. Mariage, « Simulation numérique de l'endommagement ductile en formage de pièces massives ». Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2003.
- [Mer1998] Mercier F., Contribution à la modélisation de l'emboutissage de tôles minces par approche inverse, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, France, 1998.
- [Rice69] Rice, Tracey, « On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields ». J. of Mechanics and Physics of Solids, vol.17, p.201-217, 1969.
- [Tvergaard84] V. Tvergaard, A. Needleman, « Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar ». Acta Metall. Mater., vol.32, p.157-169, 1984.