

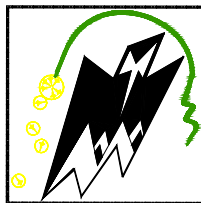
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**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**



***Mémoire de fin des études***

*Présenté et soutenu publiquement le 20 décembre 2018*

En vue de l'obtention

Du diplôme de ***Master Académique en Génie Mécanique***

Option : ***fabrication mécanique et productique***

**Thème**

**Simulation numérique par la méthode MEF  
de L'évolution austénite-martensite lors de l'emboutissage  
de l'acier trip 304l**

**Proposé et dirigé par :**

**M Rabah FERHOUM  
Mm Tassadit CHERFI**

**Présenté par :**

**Samia BESSALAH  
Mahdjouba BAIK**

Promotion 2017/2018

## **JE DÉDIE CE MÉMOIRE À**

**A l'Eternel, mon Dieu, le Tout puissant de m'avoir aidé à arriver au bout de mes études supérieures, lui qui m'a accompagné dès le début jusqu'à la fin, il est mon ombre à ma main droite !dieu merci.**

### **Mes parents**

**Ma mère, Ma grande mère qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.**

**Mes oncles, qui peuvent être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.**

**Mes frères et mes amis qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.**

# Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## **Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L**

Introduction .....	03
I-1-Définition de l'acier .....	03
I-2-Aciers à effet TRIP .....	03
I-3-Composition des aciers TRIP .....	04
I-4- L'obtention d'un acier TRIP .....	05
I-5-La transformation martensitique .....	06
I-6- Métallurgie des aciers a effet TRIP .....	06
I-7- Aciers TRIP multiphases .....	07
I-8-Application de l'acier TRIP .....	09
I-9 Influence de la vitesse de déformation sur la transformation martensitique .....	09
I-10 Influence de la température sur la transformation martensitique .....	10
I-11 Influence du mode de chargement sur la transformation.....	12
II Emboutissage des aciers à transformation martensitique.....	14
II-1 Généralités sur l'emboutissage .....	14
II-2 Propriétés nécessaires pour matériaux des outils .....	15
II-3 l'emboutissage en température .....	15
II-3-1 l'emboutissage à froide.....	15
II-3-2 l'emboutissage à chaud .....	16
II-4 les différentes phases de l'emboutissage.....	16
II-5 Différents Types d'essais standards d'emboutissage .....	17
II- Introduction .....	17
II-5-1 Essai Swift .....	17

II-5-2 Essai Nakazima .....	18
II-5-3 Essai Marciniak .....	18
II-5-3-1 Préparation des échantillons (flans) .....	19
II-5-3-2 Mise en œuvre de l'essai et acquisition des images .....	20
II-5-4 Essai Erichsen .....	22
II-5-5 Essai de gonflement hydraulique .....	23
II-6 Emboutissage de l'acier Inox 304L .....	24
II-7 Principaux modes de déformation en emboutissage .....	25
II-7-1 le mode en expansion .....	25
II-7-2 le mode en rétreint.....	25
II-8 Spécificités des aciers à transformation martensitique vis-à-vis de l'emboutissage .....	26
II-9 Transformation martensitique dans les procédés d'emboutissage.....	27
II-10 Courbes limites de formage .....	28
II-11 Les avantages et les inconvénients de l'emboutissage.....	30
II-11-1 Les avantages .....	30
II-11-2 les inconvénients .....	30

## **Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis**

Introduction .....	31
I-1 Intérêt de la simulation numérique de l'emboutissage .....	31
I-2 Méthodes de simulation numérique pour l'emboutissage.....	33
I-3 Eléments finis utilisés dans la simulation numérique de l'emboutissage.....	34
I-3-1 Approche membrane .....	34
I-3-2 Approches bidimensionnelles et approches solides .....	34
I-3-3 Approche coque .....	34
I-4 Modélisations mécaniques du procédé de l'emboutissage .....	35
I-4-1 Modèle rigide plastique .....	35
I-4-2 Modèle viscoplastique.....	36

I-4-3 Modèle superplastique .....	36
I-4-4 Modèle élastoplastique .....	36
I-5 Différents logiciels de simulation numérique .....	37
<b>II Présentation de logiciel Abaqus .....</b>	<b>38</b>
II-1 La simulation numérique .....	40
II-2 Les principaux modules .....	40
1) Dessiner le modèle .....	42
2) Affecter les propriétés matériau à l'objet .....	41
3) Assembler le modèle .....	42
4) Définir les étapes d'analyse .....	43
5) Créer les interactions entre les instances .....	43
6) Appliquer les conditions aux limites et les chargements .....	43
7) Mailler le modèle .....	43
8) Créer et soumettre un calcul .....	44
9) Visualiser les résultats .....	44
10) Le module « SKETCH » .....	44

## **Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique**

Introduction .....	45
III-1 Équations gouvernantes du modèle et étude numérique .....	45
III-1-1 Description du modèle constitutif .....	45
III-1-2 Équations constitutives des vitesses de déformation plastique .....	47
III-2 présentation du matériau utilisé .....	50
a) Composition chimique .....	50
b) propriétés mécaniques .....	50
III-3 Simulation numérique d'emboutissage .....	51
III-3-1 Emboutissage de Swift .....	51

III-3-2 Description des conditions de la simulation .....	52
III-3-3 Les conditions aux limites .....	53
III-3-4 Le maillage .....	53
III-4 Etude de l'évolution de l'effort d'emboutissage .....	54
III-4-1 les résultats obtenus avec ABAQUS .....	54
III-4-2 les résultats obtenus avec le programme de IWAMOTO injecté dans ABAQUS ..	62
III-5 CONCLUSION .....	67

# Liste des figures

## Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

Figure I-1: Les aciers TRIP dans le diagramme Résistance – Ductilité.[I 1] .....	04
Figure I-2: diagramme fer-carbone.....	05
Figure I-3 : Schéma typique du traitement thermique appliqué aux aciers multiphasés à effet TRIP F : Ferrite, A : Austénite, B : Bainite, M : Martensite.[I 2] .....	06
Figure I-4 : Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de Martensite dans un grain d'austénite.[I 2] .....	08
Figure I-5 : Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés après attaque électrochimique (TRIP600-700-800-1000).[I 2] .....	08
Figure I-6 : Traverse de pare chocs en TRIP 780 electrozingue (ep. 1,6mm) [I 4] .....	09
Figure I-7 : Renfort de pied milieu en TRIP780 electrozingue (ep.: 1,2mm)[I 3] .....	09
Figure I-8 : Fraction volumique de martensite formée en fonction de la déformation vraie à différentes vitesses de déformation (AISI 304) [I 6] .....	10
Figure I-9 : Fraction volumique de martensite formée en fonction de la déformation Vraie à différentes températures de l'acier AISI304 [I 6] .....	11
Figure I-10:Fraction volumique de martensite formée en fonction de la déformation vraie pour une traction biaxiale et une traction uniaxiale (AISI304) [I 8] .....	12
Figure I-11: Fraction volumique de martensite formée en fonction de la déformation pour différents modes de chargement (AISI304) [I 8] .....	13
Les Figure I-12 : Courbes de contrainte-déformation (a) et évolution de la fraction de martensite en fonction de la déformation plastique pour des essais de traction et de compression uniaxiale pour différentes températures [I 10] .....	13
Figure I-13 : procédé d'emboutissage .....	15
Figure I-14 : les différentes phases de l'emboutissage. ....	17

Figure I-15 : Essai Swift [I 12] .....	18
Figure I-16 : Essai Nakazima [I 13] .....	18
Figure I-17: Géométrie du poinçon pour essais Marciniak. ....	19
Figure I-18 : Epreuve initiale de forme octogonale, pour essai Marciniak e traction équiaxiale .....	20
Figure I-19: Film de téflon intercalé entre le Poinçon et le contre flan ou le flan.....	20
Figure I-20: Dispositif d'essai Marciniak.....	21
Figure I-21 : Epreuve emboutie, résultant d'un essai Marciniak interrompu sur acier Inox 304L.....	22
Figure I-22 : Essai Erichsen.....	22
Figure I-23: Essai de gonflement hydraulique .....	24
Figure I-24 : Dispositif expérimental utilise pour les essais d'emboutissage de l'acier inox304 L .....	24
Figure I.25 : Modes de déformation dans le cas de l'emboutissage d'une pièce de révolution. [I 34] .....	25
Figure I.26: Deux modes principaux de déformation en emboutissage [I 35]. ....	26
Figure I-27 : Répartition de la fraction volumique de martensite sur un godet d'acier inoxydable[I 20] .....	28
Figure I-28 : Courbes limites de formage (a) d'un acier 304 (b) e l'acier TRIP 800[II 24] .....	29

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

Figure II 1: L'interface d'Abaqus/Cae .....	41
---	----

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage- simulation numérique

Figure III.1 : Schématisation de l'essai d'emboutissage simulée .....	
Figure III.2 : dimensions de l'outillage et du flan .....	
Figure III.3 : représentation des conditions aux limites .....	
Figure III.4 : représentation du maillage d'éprouvette .....	
Figure III.5 : courbe obtenu par la simulation numérique, a\ rayon de courbure 3, b\ rayon de courbure 1.5 ....	
Figure III.6: représente la contrainte équivalente et la déformation plastique pour certains déplacements du poinçon .....	
Figure III. 7 : Initiation de la rupture sur l'embouti acier trip 304L (X2CrNi18-9) .....	



Figure III.8: Superposition de la courbe expérimentale et numérique de l'essai d'emboutissage pour certains déplacements du poinçon .....	
Figure III.9: Superposition de la courbe expérimentale et numérique de l'essai d'emboutissage pour certains déplacements du poinçon .....	
Figure III.10 : représente la contrainte équivalente et la déformation plastique du modèle WAMOTO développé par SIDHOUM pour certains déplacements du poinçon .....	
Figure III.11: Superposition de la courbe expérimentale et numérique obtenu avec le modèle initié par IWAMOTO développé par SIDHOUM pour l'essai 1 .....	
Figure III.12: Superposition de la courbe expérimentale et numérique obtenu avec le modèle initié par IWAMOTO développé SIDHOUM pour l'essai 2 .....	



# Liste des tableaux

## Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

Tableau I-1.Exemple de compositions et fraction de phases de différentes nuances d'aciers TRIP[I 3]. .....	07
--	----

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

Le tableau III.1 : composition chimique de la tôle utilisé]. .....	50
Le tableau III.2 : propriétés mécaniques de l'acier TRIP 304L.....	50

# Liste des symboles

TRIP: transformation induced plasticity;

AISI : Institut américain du fer et de l'acier (normalisation) ;

AFNOR : Association française de normalisation ;

X : Désignation européenne représente les aciers fortement alliés suite à la teneur en carbone multipliée par 100

F: Ferrite ;

A: Austénite;

B: Bainite;

M: Martensite;

A : allongement [%]

E (mpa) :Module de Young

R<sub>m</sub> (mpa) : Résistance à la rupture

R<sub>p</sub> (mpa) : Limite plastique

F<sub>f</sub>(N) : Force de frottement

# Introduction Générale

La transformation des tôles mécaniques en produits finis a une importance considérable dans de nombreuses industries telles que la construction mécanique, l'automobile ou l'aéronautique. Le déchirement prématuré de la tôle lors de la mise en forme (emboutissage, pliage) est l'un des grands problèmes posés actuellement au niveau de l'industrie mécanique. Les scientifiques et les industriels cherchent donc toujours les meilleures conditions pour lesquelles l'aptitude à la déformation peut aller à son tour maximum afin de minimiser les rebuts, 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.

Les aciers à effet TRIP répondent aux exigences posées dans les cahiers des charges en termes de résistance et de ductilité. Au cours d'un chargement thermomécanique dans ces aciers, l'effet TRIP (TRAnsformation Induced Plasticity) dû à la transformation de l'austénite résiduelle en martensite se traduit par une évolution de leur microstructure. La transformation peut améliorer le comportement mécanique (la formabilité, la résistance et la capacité d'absorption d'énergie,...) ce qui rend particulièrement attractif l'emploi des aciers à effet TRIP pour des applications industrielles à fortes valeurs ajoutées telles que la réalisation des pièces de renfort des véhicules.

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 des données associées aux interfaces graphiques à la disposition de l'utilisateur de CAE. 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, FORGE1 et 2, etc.

Dans ce travail, nous avons tenté de faire et de présenter la simulation numérique de procéder d'emboutissage des tôles en acier trip 304L, en utilisant le modèle de Sidhoum, décrit le comportement du matériau lors de sa mise en forme.

Notre travail est reparti en trois chapitres :

Nous avons après l'introduction, la première partie du premier chapitre, sera consacré à la définition de l'acier TRIP 304L, son comportement mécanique, ainsi la transformation martensitique de cet acier dans les différentes conditions. puis La dernière partie de ce chapitre présente les différentes configurations d'essais d'emboutissage.

Dans le deuxième chapitre, on présentera la méthode et l'intérêt de simulation numérique d'emboutissage dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS et la présentation de ce dernier.

L'objectif du troisième chapitre, est de mettre en application notre étude par la simulation numérique du procédé d'emboutissage, avec le modèle d'IWAMOTO développé par Sidhoum. une comparaison qualitative est quantitative, entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux.

# Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

## I-Introduction :

Dans ce chapitre à caractère bibliographique nous avons fait une recherche sur les aciers en général et les aciers à effet TRIP en particulier. Ensuite on a étudié la transformation martensitique et quelques facteurs physiques influencent sur cette conversion.

Enfin on a présenté les différentes configurations d'essais d'emboutissage qui permettent de caractériser le comportement de l'acier étudié (acier TRIP 304L) tout au long de la transformation.

## I-1-Définition de l'acier :

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. Selon les aciers, la teneur en carbone est comprise entre 0.005% et 1.5% en masse. Elle monte très rarement jusqu'à 2%. Pourtant c'est bien cette teneur en carbone qui confère à l'acier de manière assez complexe les propriétés que l'on lui reconnaît, par exemple plus la teneur en carbone d'un acier est importante plus l'acier est dur.

## I-2-Aciers à effet TRIP :

Les aciers désignés par le terme TRIP sont des aciers présentant un comportement mécanique particulier. Ils ont à la fois une résistance élevée et une haute ductilité, ce qui les rend particulièrement intéressants pour la mise en forme par déformation plastique.

Les aciers à effet TRIP sont classés dans deux catégories, en fonction de leur microstructure :

- Aciers à effet TRIP entièrement austénitiques, qui sont fortement alliés (Fe-Ni, AISI 304, AISI 301,)
- Aciers TRIP multiphasés, qui sont faiblement alliés et seulement partiellement austénitiques.

Dans cette étude, l'acier étudié appartient à la catégorie : aciers inoxydables de type AISI 304L. L'acier inoxydable est un alliage de fer comportant au moins 10,5% de chrome (Cr) et au plus 1,2% de Carbone (C) nécessaire pour garantir la formation d'une couche de surface auto-régénératrice (couche passive) qui apporte la résistance à la corrosion. Le processus peut prendre quelques heures après une altération de la surface.

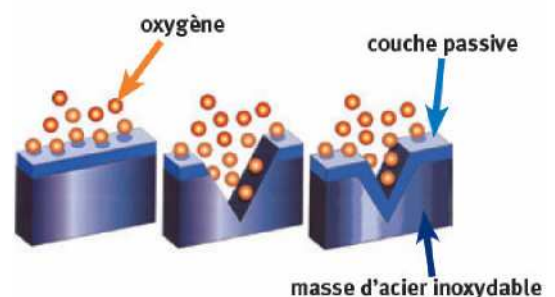
Principales Familles :

**Asthénique** : fer-chrome-nickel, carbone < 0,1%,  
amagnétique à l'état de livraison.  
Représente > 65% de l'utilisation d'acier  
inoxydable, notamment dans les  
luminaires.

**Ferritique** : fer-chrome, carbone < 0,1%, magnétique.

**Martensique** : fer-chrome, carbone > 0,1%,  
magnétique et apte à la trempe.

**Duplex** : fer-chrome-nickel, structure mixte austénique-ferritique, magnétique.



# Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

Cet effet consiste à obtenir un acier austénitique à température ambiante après une trempe, et à retransformer une partie de celui-ci grâce à une déformation pour obtenir des parties martensitiques et donc un acier du type multiphasé. Les aciers à effet TRIP présentent, un bon compromis résistance –ductilité ( $R_m$  600 à 1200 MPa, A% 15 à 40%).

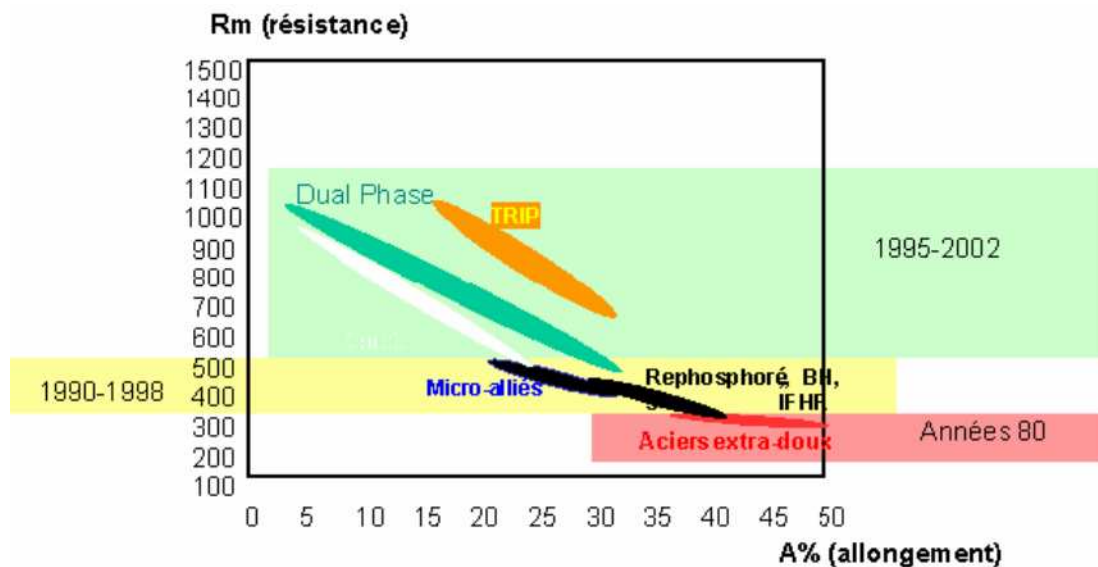


Figure I-1: Les aciers TRIP dans le diagramme Résistance – Ductilité.[I 1]

## I-3-Composition des aciers TRIP :

Les aciers à effet TRIP, font partie de la classe des aciers hypoeuctectoides ou faiblement alliés, leur pourcentage de carbone étant inférieur à 0.85%. Le diagramme fer-carbone simplifié ci-dessous montre le domaine d'existence des aciers à effet TRIP.

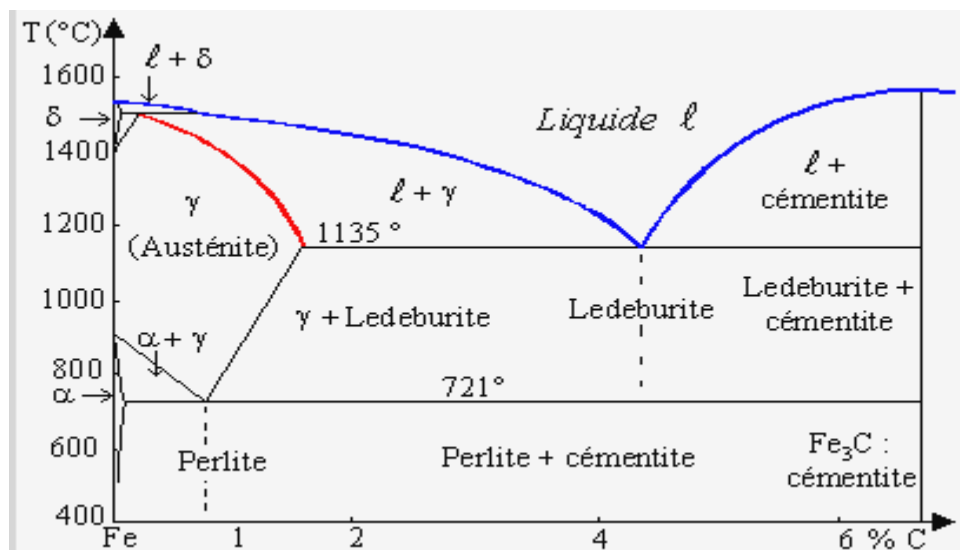


Figure I-2: diagramme fer-carb

Afin d'obtenir l'effet TRIP, il est nécessaire d'incorporer dans l'alliage du silicium et/ou de l'Aluminium, ces composants servant à stabiliser la structure austénitique de l'acier lors du



## Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

refroidissement. Ainsi, à température ambiante, l'acier obtenu conserve de l'austénite dans sa structure cristalline, appelée austénite retenue, base de l'effet TRIP. Il est donc possible de dégager les proportions habituelles des constituants d'un acier à effet TRIP (en %massique).

### I-4- L'obtention d'un acier TRIP :

L'obtention d'un acier TRIP commence par la réalisation d'une trempe, l'expérience dit qu'une trempe est efficace si l'acier contient plus de 0.35% de carbone. Il faut donc, si besoin, réaliser une cémentation sur l'acier à tremper, sa teneur en carbone étant comprise entre 0.1 et 0.4% de carbone.

La trempe se déroule en 4 étapes distinctes :

- la première étape est un maintien de l'acier entre les températures inter critiques, températures entre lesquelles l'acier a une structure austénitique et ferritique.
- la seconde étape consiste en un refroidissement rapide jusqu'à la zone d'existence de la bainite.
- on réalise alors un second maintien dans la zone bainitique. Ceci permet d'éviter l'obtention de martensite pure en grande proportion dans la structure.
- la dernière étape est un second refroidissement de l'acier, celui-ci jusqu'à température ambiante, on obtient un acier contenant de l'austénite retenue.

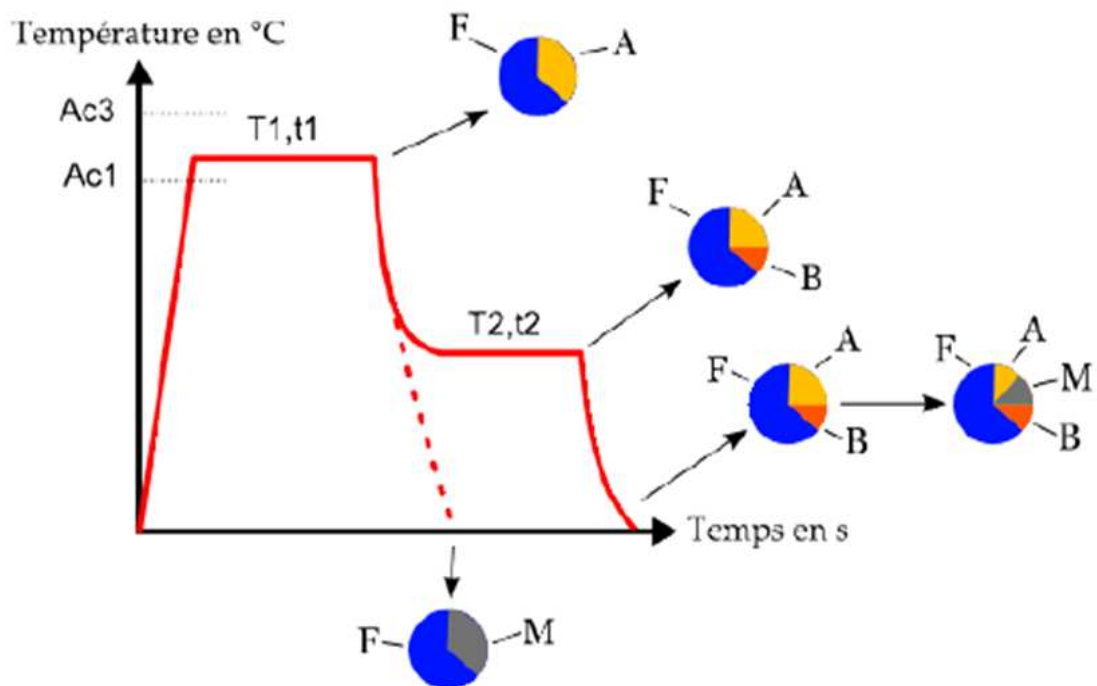


Figure I-3 : Schéma typique du traitement thermique appliqué aux aciers multiphases

à effet TRIP F : Ferrite, A : Austénite, B : Bainite, M : Martensite.[I 2]

### I-5-La transformation martensitique :

# Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

Le terme transformation martensitique est à l'origine associé à la transformation qui se produit lors de la trempe des aciers : l'austénite formée à haute température se transforme en martensite par refroidissement rapide pour éviter la diffusion. Elle se manifeste par un changement de structure cristalline qui se produit par un déplacement des coordonnées des atomes sur quelques distances interatomiques. C'est pourquoi la transformation martensitique est sans diffusion. L'absence de diffusion implique non seulement que la phase austénitique (phase mère) et la martensite ont la même composition chimique, mais de plus, la martensite hérite de l'ordre et des défauts de la phase mère.

## I-6- Métallurgie des aciers a effet TRIP :

Suivant la composition chimique, on distingue deux catégories d'aciers à effet TRIP :

- les aciers a effet TRIP fortement alliés (Fe-Ni, AISI301,.....) qui sont entièrement austénitiques.
- les aciers TRIP faiblement alliés qui sont partiellement austénitiques (multiphases).

Au courant de la dernière décennie, les industriels s'intéressent en particulier a l'effet des aciers faiblement alliés multiphases pour leurs caractéristiques mécaniques remarquables.

## I-7- Aciers TRIP multiphases :

Les nuances d'aciers TRIP multiphases diffèrent par leur composition chimique et leur proportion de phase. Le tableau I-1 donne des exemples de composition d'aciers TRIP ayant les résistances maximales de 600MPa et 1000MPa .Lors de l'élaboration, le matériau subit une succession de transformation qui lui confère différentes fractions volumiques de phase, une répartition spatiale (connexité) des dimensions caractéristiques (taille des lattes de bainite,etc),une texture morphologique ,une texture cristallographique. Les micrographies sont présentées sur le tableau I-1.

TRIP	Taille d'égrain Austénite (μm)	Composition (% pds)			Fraction de phase (%)				% C dans
		C	Mn	Si	γ	α	b	α̇	
600	4	0.08	1.70	1.55	8	91	1		
700	3	0.16	1.60	1.60	13				
800	2-3	0.2	1.65	1.65	17	70-73	10-13		1.14
1000	1-2	0.4	1.65	1.65	30		~70		1.35

Tableau I-1.Exemple de compositions et fraction de phases de différentes nuances d'aciers TRIP[I 3]

## Chapitre I : comportement mécanique des aciers TRIP 304L

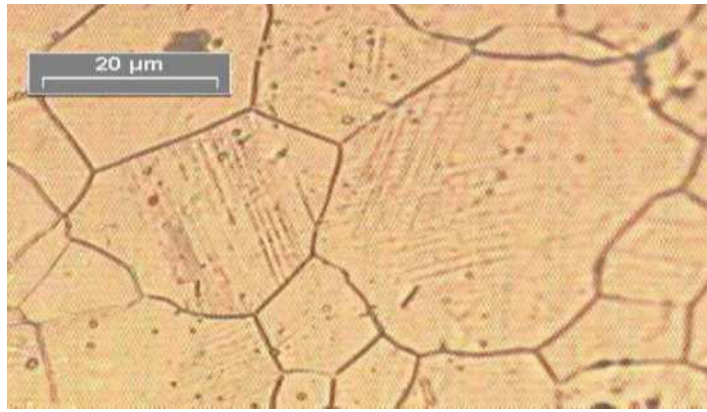


Figure I-4 : Micrographie optique de l'acier AISI304. Apparition de Martensite dans un grain d'austénite.[I 2]

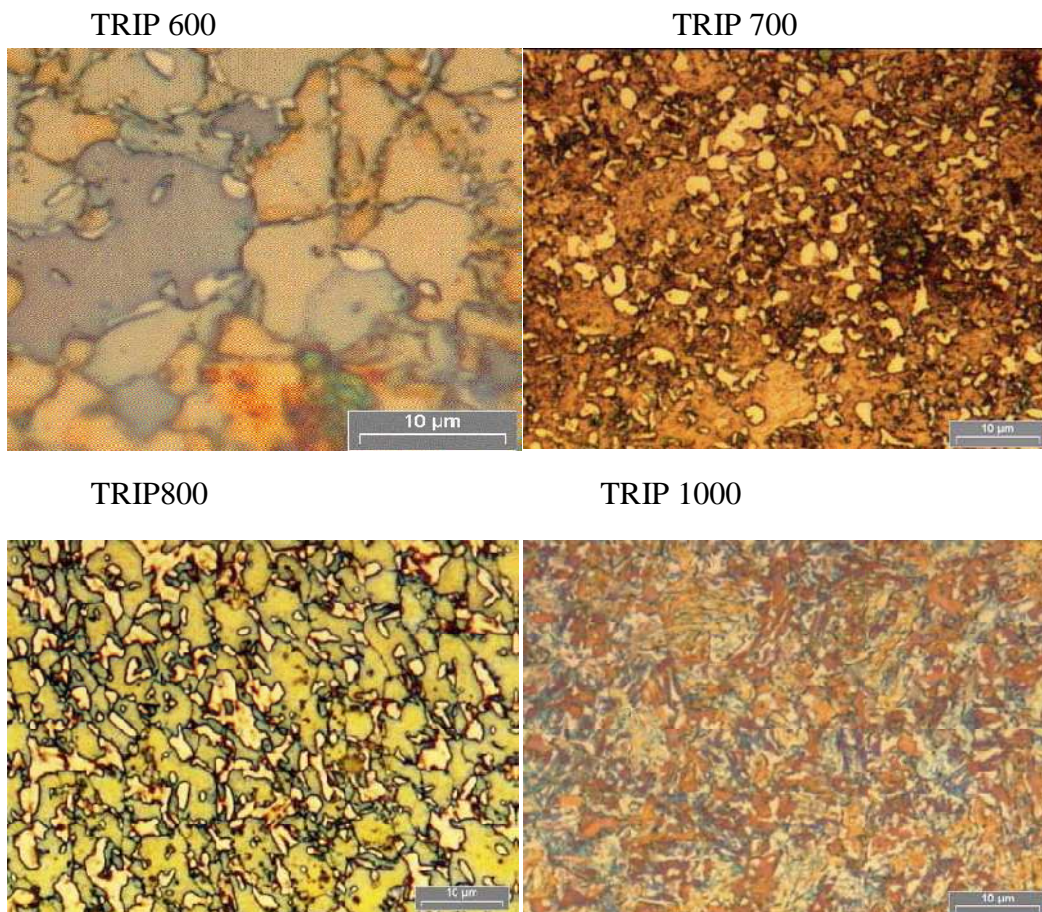


Figure I-5 : Micrographies optiques des aciers TRIP multiphasés après attaque électrochimique (TRIP600-700-800-1000).[I 2]

### I-8-Application de l'acier TRIP :



Figure I-6 : Traverse de pare chocs en TRIP 780 electrozingué (ep. 1,6mm) [I 4]  
1,2mm)[I 3]



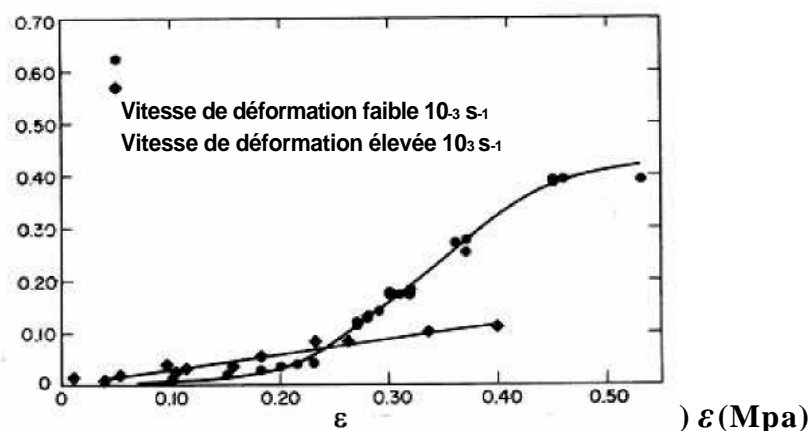
Figure I-7 : Renfort de pied milieu en TRIP780 electrozingué (ep.: 1,2mm)

L'étude de la transformation martensitique réalisée sur l'acier à effet TRIP a permis de caractériser plusieurs paramètres chimiques et physiques qui influent sur cette transformation lors de la déformation plastique. On peut citer quelques facteurs physiques:

### I-9 Influence de la vitesse de déformation sur la transformation martensitique:

La vitesse de déformation est un facteur qui influence beaucoup la cinétique de la transformation martensitique [I 5]. La figure I-8 représente l'évolution de la fraction martensitique en fonction de la déformation pour l'acier austénitique instable AISI 304 à température ambiante et pour deux vitesses de traction différentes ( $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  et  $10^3 \text{ s}^{-1}$ ).

Figure I-8 : Fraction volumique de martensite formée en fonction de la



déformation vraie à différentes vitesses de déformation (AISI 304)

Pour les faibles déformations (jusqu'à  $\epsilon = 0,2$ ), la fraction de martensite formée augmente avec la vitesse de déformation. Par contre, pour les grandes déformations, la tendance

ERROR: IOError  
OFFENDING COMMAND: image

STACK:



## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

---

### Introduction :

La réalisation d'un emboutissage s'avère donc complexe, et sa réussite est souvent liée à l'expérience. En effet, l'emboutissage se définit, rappelons-le, par une transformation permanente d'une feuille de métal en une forme tridimensionnelle par l'action d'outils.

Ce qui permet de mettre en exergue les aspects suivants :

- Les grandes transformations géométriques d'une structure mince.
- Le comportement élasto-plastique anisotrope du matériau.
- Les contacts et frottements entre les outils et la tôle.

Ainsi, nombreux sont ceux qui, désireux de connaître mieux le processus afin de l'améliorer, ont développés des aides à la conception des outils et autres outils d'analyses et de simulation. Nous pouvons répertorier des méthodes géométriques, expérimentales et analytiques sur des formes simples. Plus proche de nous, l'ordinateur et l'avènement de la méthode des éléments finis, qui ont permis le développement du calcul numérique, ont mené à la création de logiciels permettant la simulation de crashes et le calcul des structures. A partir de ces codes, des logiciels de simulation numérique d'emboutissage des tôles sont apparus.

### I-1 Intérêt de la simulation numérique de l'emboutissage

Les facteurs principaux dont dépend la réussite de l'opération d'emboutissage sont : le matériau de la tôle, les paramètres de l'outillage et les conditions opératoires. Les deux premiers facteurs constituent des thèmes de recherche majeurs en emboutissage. Les propriétés mécaniques des matériaux qui influent directement sur la réussite de l'opération de l'emboutissage sont:

- La limite d'élasticité ( $R_e$ )
- La résistance à la rupture ( $R_m$ )
- L'allongement à la rupture ( $A$ )
- Le coefficient d'écrouissage ( $n$ )
- Le coefficient d'anisotropie ( $r$ )

Qui peuvent être déterminées au moyen d'un simple essai de traction.

D'autres propriétés sont souvent prises en compte pour juger l'emboutissabilité d'une tôle par exemple :

- la courbe limite de formage ( CLF) ou FDL (Forming Limit Diagram).
- le rapport limite l'emboutissage, LDR ( Limiting Drawing Ratio ).
- la profondeur maximale de Godet.
- le profondeur limite de pièce hémisphérique LDH (Limiting Dome Heith).

Il est très important à ce niveau de tenir compte du fait que ces propriétés ne sont pas constantes au cours de l'opération de la mise en forme. Ces propriétés varient en fonction des chemins de déformation, la complexité de la forme des pièces, la vitesse de déformation et de l'augmentation de température.

Après avoir déterminé le comportement du matériau, il faut caractériser l'outillage du procédé en définissant les propriétés suivantes :

- la forme et l'état de surface de l'outillage, les profils des outils.
- le jeu entre le poinçon et la matrice, la forme et la position de jonc du retenue.

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

---

- la cadence de la production, la pression de serre flan.
- la lubrification (dans certain cas).

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des outils de l'emboutissage pour améliorer la qualité des produits et réduire les coûts de fabrication. Les outils sont réalisés en fonte pour des grandes séries (plus de 1000000 de pièces) et en béton de résine pour les pièces prototypes (de l'ordre de 100 pièces). Les défauts des pièces embouties peuvent apparaître pendant ou après l'opération de l'emboutissage, ils se produisent sous les formes suivantes:

- striction /rupture plis
- défaut dimensionnels (retour élastique, amincissement inacceptable)
- défauts surfaciques (rayures, peau d'orange)

L'intérêt de simuler l'emboutissage par des essais numériques se traduit de la manière suivante :



- Ces essais peuvent se substituer en partie à l'expérimentation coûteuse pécuniairement et temporellement.
- Ils sont utilisés en amont dans le processus de conception, permettant de réduire encore les délais de mise au point.
- La simulation numérique permet également de comparer différentes configurations afin d'optimiser la solution, soit entre autres :
  - Améliorer la qualité de la pièce.
  - Gagner de la matière et par là même réduire les coûts.

Ainsi dès le stade du bureau d'études et tout au long de la phase de conception, la simulation numérique se comporte comme un outil d'analyse et d'aide à la conception. Elle permet d'évaluer de manière qualitative les difficultés de faisabilité des pièces, par rapport au cahier des charges, par l'identification des problèmes de striction-déchirures, de formation de plis et de biens d'autres effets indésirables.

### I-2 Méthodes de simulation numérique pour l'emboutissage

Comme nous l'avons stipulé précédemment, ces méthodes doivent, dans la mesure du possible, prendre en compte différentes non linéarités (grandes transformations élasto-plastiques, contacts-frottements), qui combinées, forment un système fortement non linéaire.

Nous pouvons effectuer le distinguo suivant pour classifier les différentes méthodes :

-  Les outils de simulation du processus, qui par la connaissance du flan dans son état initial (forme, matériau), permettent de déterminer les caractéristiques des configurations intermédiaires et finales de l'objet (trajectoires des points matériels, répartition des déformations et épaisseur, contraintes résiduelles) en tenant compte des sollicitations et conditions géométriques imposées par la présence d'outils (poinçon, matrice, serre-flan).
-  Les outils d'analyse de l'emboutissabilité d'une pièce, qui à partir de la connaissance de la géométrie désirée, permettent d'étudier l'influence de différents paramètres pour définir :
  - la géométrie du flan initial (forme, contour)
  - le procès (conditions aux limites, forces de serrage, frottements, positions et formes de jons)
  - le matériau (limite élastique, écrouissage, anisotropie)

L'approche incrémentale est assez largement utilisée pour les codes dédiés à la simulation car, elle prend en compte de manière précise les non-linéarités (élasto-plasticité, contacts). L'expression des lois de comportements est fonction des taux de déformations et de contraintes.

## **Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis**

---

### **I-3 Eléments finis utilisés dans la simulation numérique de l'emboutissage :**

Les modèles de simulation numériques de l'emboutissage dépendent fortement du type des éléments finis utilisés pour discrétiser la tôle. Dans la littérature, on trouve des approches membranes, approches 2D, approches solides et approches coques.

#### **I-3-1 Approche membrane :**

Dans cette approche, seuls les effets des composantes des efforts dans le plan de la tôle sont pris en compte. Plusieurs modèles basés sur cette approche ont été proposés [II 1] [II 2] [II 3] [II 4]. Ces approches ont permis aux auteurs de prévoir la répartition des déformations et des contraintes ainsi qu'une bonne estimation des efforts exercés sur les outils avec des temps de calcul et des espaces mémoire faibles par rapport aux autres approches. Mais le problème qui se pose est qu'une approche pareille ne permet pas de prévoir les phénomènes des plis et les phénomènes de cisaillement qui sont très importants en emboutissage.

#### **I-3-2 Approches bidimensionnelles et approches solides :**

Dans le but de simplifier la simulation numérique de l'emboutissage, plusieurs approches se sont limitées à une étude bidimensionnelle ou axisymétrique du procédé, ce qui a permis d'aboutir souvent à de bons résultats. Dans toutes ces approches, les formes des emboutis étudiées étaient simples. Ce qui n'est pas toujours le cas, surtout lorsque on parle de l'industrie automobile. Les approches tridimensionnelles basées sur des éléments volumiques (solides) sont plutôt utilisées dans la simulation des procédés de mise en forme des produits massifs tels que le laminage et la coulée continue ou le forgeage. Les modèles basés sur cette dernière approche ne sont pas nombreux. Ceci s'explique par les temps de calcul très importants générés par ces types d'éléments. Par ailleurs, vu la faible épaisseur des tôles utilisées dans l'industrie de l'emboutissage, une approche coque semble la plus réaliste pour une simulation de ce procédé.

#### **I-3-3 Approche coque :**

Dans cette approche, les effets de flexion dans le plan de la tôle sont superposés aux effets membranes. Plusieurs simulations basées sur cette approche ont été développées [II 5] [II 6] [II 7]. La formulation coque semble la formulation la plus efficace dans la discrétisation par éléments finis des tôles destinées pour la mise en forme.

### **I-4 Modélisations mécaniques du procédé de l'emboutissage :**

La simulation numérique de l'emboutissage nécessite une description très fine des phénomènes physiques et mécaniques rencontrés pendant les différentes phases du procédé. L'introduction des lois de comportement du matériau, aussi réalistes que possibles et prenant en compte des processus physiques susceptibles d'intervenir, est indispensable [II 8]. Dans la littérature de la simulation des procédés de mise en forme, différents modèles ont été adoptés pour décrire le comportement du matériau à emboutir. Il est difficile de classer ces approches par méthodologie car la mise en forme des métaux fait intervenir des problèmes divers nécessitant des approches variées. Néanmoins, on va citer dans cette section celles qui sont les plus utilisées dans les simulations numériques du procédé.



## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

---

### I-4-1 Modèle rigide plastique :

Dans ce modèle, le comportement est supposé être parfaitement plastique, les déformations élastiques sont négligées. On peut citer le modèle de Kobayashi [II 9] [II 1]. Dans d'autres modèles l'aspect d'anisotropie a été développé [II 10] [II 11]. Le problème de contact et de frottement est pris en compte, au début, dans le modèle rigide plastique de Zienkiewicz et al [II 12]. Dans un modèle rigide plastique, les équations constitutives impliquées sont plus simples, comparées aux autres approches. La formulation éléments finis correspondante est une formulation généralement en vitesse et les contraintes sont liées directement aux taux de déformations et ils ne sont pas réactualisés par leurs incréments mais calculés à la fin de chaque pas. L'approximation faite dans ce modèle peut être justifiée dans le cas de forgeage où le niveau des déformations plastiques atteintes est très élevé. Elle peut atteindre des centaines pour cents comparées aux déformations élastiques. Dans l'emboutissage à froid, les déformations élastiques ne sont pas négligeables, ainsi que les phénomènes du retour élastique et des contraintes résiduelles ne peuvent être accessibles facilement par un tel modèle. Par contre, avec des temps de calcul de 2 à 3 fois moins élevés (à discrétisations égales), elles sont particulièrement efficaces pour la simulation du forgeage où le taux de corroyage et le remplissage des formes en matrice sont principalement recherchés [II 13].

### I-4-2 Modèle viscoplastique :

En général, le comportement viscoplastique est modélisé par une loi de Norton-Hoff [II 14]. Ce modèle est généralement utilisé dans les procédés de mise en forme à chaud ou pour des matériaux dont l'aspect de viscosité est dominant comme le cas des polymères par exemple. Les remarques à propos de ce modèle sont semblables à celles faites sur le modèle rigide plastique.

### I-4-3 Modèle superplastique :

Certains alliages possèdent ce type de lois de comportements. Ces alliages permettent des elongations qui varient entre 200 et 1000% et peuvent atteindre, dans certains cas, 5000%. Parmi les simulations basées sur ce modèle, on peut citer [II 15]. La superplasticité du métal, dans une certaine gamme de températures et de vitesses de déformation, permet de déformer, sous des contraintes faibles, le métal et lui faire épouser la forme d'un moule. Ce type de loi de comportement est adopté souvent dans les simulations des procédés de mise en forme par gonflage.

### I-4-4 Modèle élastoplastique :

Dans la littérature, plusieurs approches sont basées sur ce modèle. Les premières simulations basées sur ce modèle étaient limitées à la théorie des petites déformations, et les conditions de contact n'étaient pas prises en compte [II 2]. Ensuite, des modèles prenant en compte l'aspect de grandes déformations élastoplastiques ont été développés [II 13] [II 16]. Dans le cas de l'emboutissage, un modèle élastoplastique semble le plus réaliste pour modéliser le comportement du matériau. D'autant plus qu'il permet un accès facile aux phénomènes des contraintes résiduelles et du retour élastique. La formulation d'éléments finis correspondante à ce modèle est une formulation en déplacement, le plus souvent, lagrangienne réactualisée. En élastoplasticité, la difficulté principale vient de la nécessité d'une configuration de référence et du grand nombre des variables d'état impliquées dans la formulation. Par ailleurs, la loi de comportement, sous sa forme incrémentale, doit être intégrée et transformée dans le principe variationnel.

. L'approche élastoplastique semble la plus utilisée pour la simulation des procédés de mise en forme des produits plats tel est le cas pour l'emboutissage. [II 13].

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

---

### I-5 Différents logiciels de simulation numérique :

Pour satisfaire les besoins de l'industrie (et surtout l'industrie automobile) en simulation numérique de l'emboutissage, des nombreux logiciels ont été développés et mis en service pour les industriels. Parmi ces logiciels, on peut citer:

- ISOPUNCH (société ISOFORM SOLLAC)
- SIMEM2 (société SIMTECH)
- ABAQUS (Société ABAQUS soft ware)
- LS-DYNA-3D (société DYNALYS)
- FORGE2 (société TRANSVALOR)
- OPTRIS (société MATRA DATA VISION)
- PAM-STAMP (société ESI)
- RADIOSS(société MECALOG)

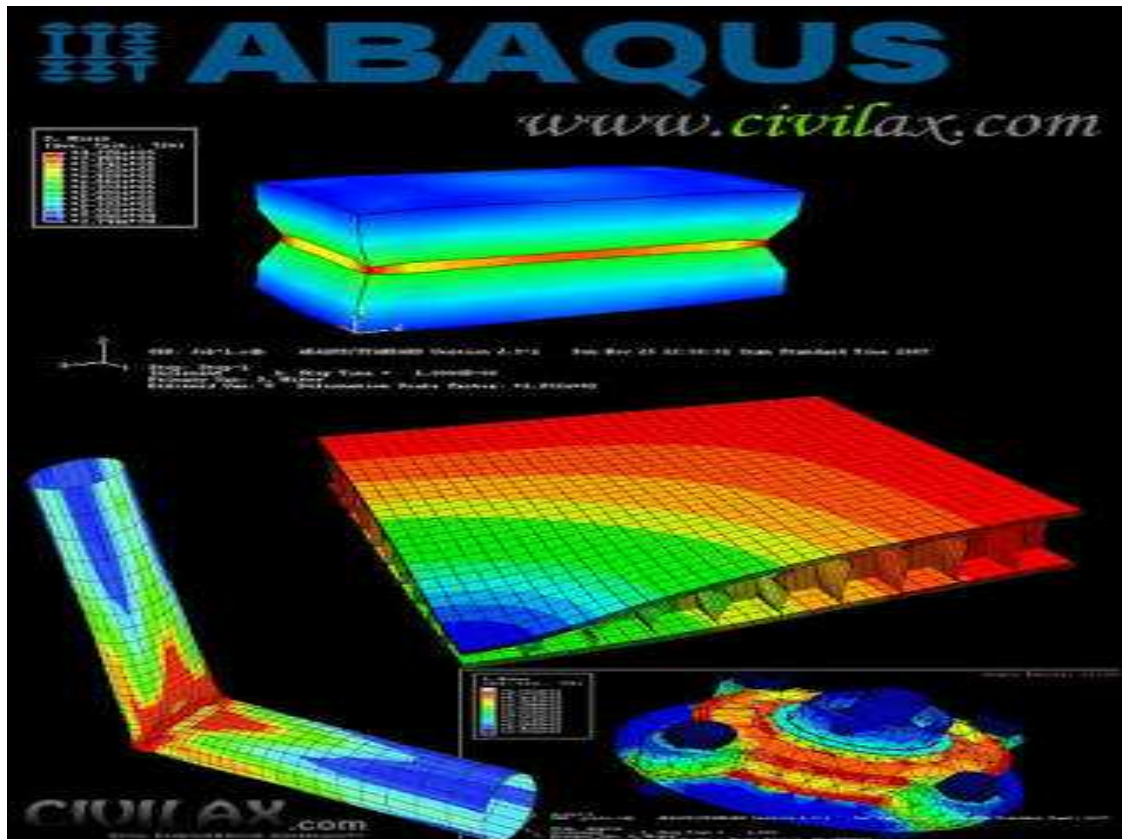
Tous ces logiciels de simulation sont fondés sur la méthode des éléments finis. Dans cette liste des codes et des outils de simulation du procédé, on peut distinguer deux catégories de modèles. Des modèles dits simplifiés et des modèles complets. Parmi les modèles simplifiés, on trouve (par exemple) l'approche dite 'approche inverse'. Cette approche inverse a été développée par l'équipe de J L. Batoz [II 17]. Batoz La première version de cette approche a été présentée en 1989 en utilisant des éléments membranes. Cette méthode permet d'éviter la lenteur de la procédure du calcul incrémentale dans l'analyse de la loi de comportement et les conditions de contact. Les points matériels dans la tôle déformée sont déterminés à partir de la forme finale de la pièce emboutie (forme CAO maillée). En 1995, cette approche a été améliorée en tenant compte des phénomènes de flexion qu'on ne peut pas négliger dans la simulation du procédé[II 18]. La méthode inverse a été implémentée dans quelques codes industriels tels que FAST3D, ICEM-STAMP, FLECH(UTC), ISOPUNSH (SOLLAC). Cette méthode fournit des résultats approchés par rapport aux modèles complets, mais elle reste un outil très rapide et très utile dans la phase du pré-dimensionnement. Les simulations ou les modèles qualifiés de 'complets' correspondent à un schéma de résolution incrémentale. L'approche incrémentale, par opposition à l'approche simplifiée, permet un suivi précis de l'évolution des différents phénomènes rencontrés pendant les différentes phases du processus. Les approches incrémentales peuvent être basées sur une méthode statique implicite (ABAQUS, MARC...), statique explicite ou dynamique explicite (OPTRIS, PAMSTAMP, RADIOS, ABAQUS...). En raison de la complexité des phénomènes à simuler (couplage de plasticité, contact...), le temps de calcul reste un facteur très pénalisant dans ces approches.

## II Présentation Le code de calcul par éléments finis 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 et Sorensen (HKS) devenus après ABAQUS, Depuis 30 ans, il 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".

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis



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.

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.odt (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.

### II-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 coûteuse. 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 où et quand un endommagement

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

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

### II-2 Les principaux modules :

Abaqus est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécaniques. 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 pour les deux solveurs.

Chacun de ces produits 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.

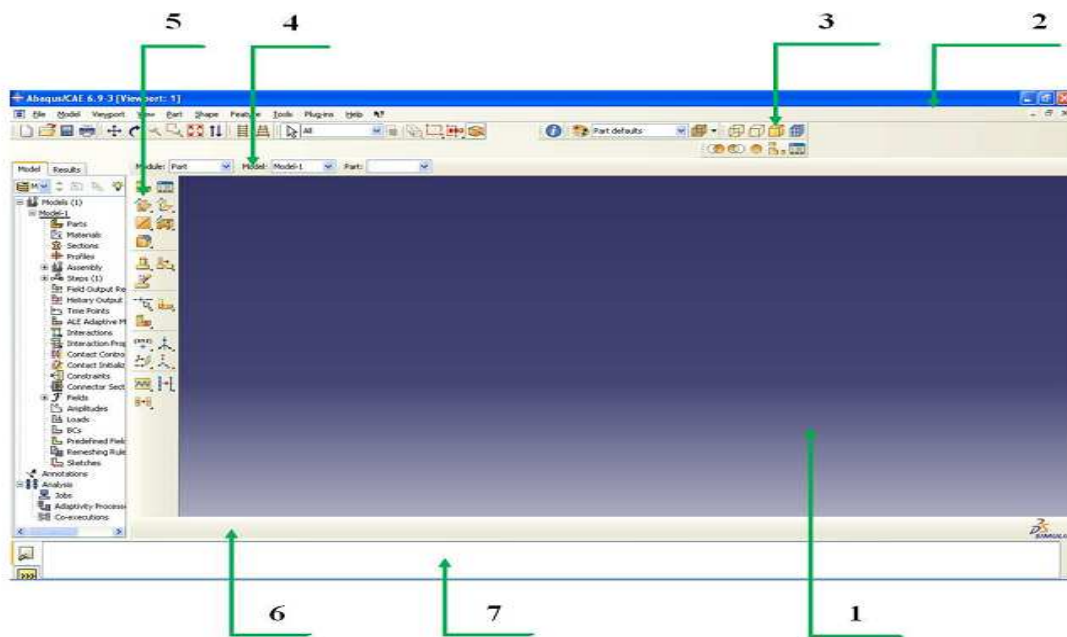


Figure II 1: L'interface d'Abaqus/Cae

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivants :

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.

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

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, rotation, etc).

4 : une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder 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 affichés à cet endroit sont faits pour 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

## Chapitre II : Simulation numérique par éléments finis

---

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 appliquer.

- 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 quels 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** : Alors faut utiliser le module **JOB** pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post traitait les résultats demandés.
- 9) **Visualiser les résultats** : le module **VISUALISATION** 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.

























# Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

---

## III Introduction:

Une analyse numérique de la formabilité des tôles d'aciers à transformation martensitique est effectuée dans ce chapitre à partir de l'implémentation, dans le sous-programme utilisateur du code d'éléments finis Abaqus /Explicit, du modèle de comportement proposé par SIDHOUM. Ce modèle, développé pour décrire le comportement des aciers présentant une plasticité induite par la transformation martensitique, ensuite nous présenterons 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. Une comparaison a été faite entre les prédictions numériques et les résultats expérimentaux.

## III-1 Équations gouvernantes du modèle et étude numérique:

### III-1-1 Description du modèle constitutif:

Dans cette section, le modèle phénoménologique constitutif, développé par IWAMOTO et AL [III.1, III.2], qui décrit le comportement mécanique des aciers TRIP. Ce modèle est basé sur une forme modifiée des modèles proposés par OLSON, G.B. et COHEN, [ III.3] et STRINGFELLOW [III.4] pour les aciers austénitiques.

Ces modèles supposent que des embryons martensitiques se forment aux intersections des bandes de cisaillement. L'augmentation de la fraction volumique de l'austénite dans les bandes de cisaillement  $f^{sb}$ , est décrite par la loi d'évolution Eq [ III.1]:

$$\dot{f}^{sb} = \alpha(1 - f^{sb}) \dot{\epsilon}_a^{pslip} \quad (III.1)$$

$\dot{\epsilon}_a^{pslip}$  : est le taux de déformation plastique effectif dans l'austénite dû à la déformation par glissement.

$\alpha$  : est un paramètre lié à l'énergie du défaut d'empilement. Est-on fonction de la température OLSON, G.B. et COHEN, [III.3].

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

---

$\dot{\bar{\epsilon}}_a^{pslip}$  : taux de contrainte et du paramètre de tri axialité de contrainte, comme le montre l'équation suivante Eq [III. 2]:

$$\alpha = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 - \alpha_4 \sum \left[ \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_a^{pslip}}{\dot{\epsilon}_y} \right]^M \quad (\text{III.2})$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  : sont des paramètres matériels,

$\dot{\epsilon}_y$  : est la vitesse de déformation de référence,

T est la température,

$\Sigma : \sigma_{ii}/(3\sigma)$  est le facteur de triaxialité,

$\sigma_{ii}$  : est le premier invariant du tenseur de contrainte de Cauchy

$\sigma$  : est la contrainte effectif.

Dans cet article, le paramètre de dépendance du taux de contrainte est ignoré car des simulations statiques simples sont effectuées. Pour ces raisons,  $\alpha$  est défini par Eq [ III.3]:

$$\alpha = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 - \alpha_4 \Sigma \quad (\text{III.3})$$

Ou  $\alpha \geq 0$

Le taux de formation de martensite,  $\dot{f}^m$ , formulé par IWAMOTO dépend de la probabilité qu'une intersection de bande de cisaillement forme un embryon martensitique tel que défini par STRINGFELLOW et [III.4]. Afin d'éliminer la complexité introduite par la probabilité distribution, SIERRA [III.5] est simplifié le taux de formation de martensite. En conclusion, le taux d'augmentation de la fraction volumique de martensite  $\dot{f}^m$ , est également régie par la déformation plastique dans l'austénite, elle est donnée dans Eq [III.4]:

$$\dot{f}^m = A(1 - f^m) \dot{\bar{\epsilon}}_a^{pslip} \quad (\text{III.4})$$

$$A = \alpha \eta (f^{sb})^{n-1} (1 - f^{sb})$$

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \Sigma$$

$\eta$  gouverne le taux de formation de martensite et dépend de la triaxialité, et  $\eta_1$  et  $\eta_2$

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

---

sont des constantes. Le terme  $\eta$  remplace la fonction de distribution de probabilité  $b$  et équivaut à la force motrice de la formation martensitique  $g$ , définie dans l'équation cinétique d'origine .

### III-1-2 Équations constitutives des vitesses de déformation plastique:

Un aspect important de la transformation martensitique est l'adoucissement de la déformation qui se produit en raison de la déformation associée au processus de transformation.

IWAMOTO et AUTRE [III.6] ont pris compte de cet adoucissement en introduisant dans le modèle constitutif un taux de déformation supplémentaire qui est proportionnel au taux d'augmentation de la fraction volumique de martensite. Ainsi, l'équation constitutive dépendante du mode de déformation pour la vitesse de déformation peut être établie comme suit : pour la formulation constitutive on a supposé une déformation infinitésimale.

La vitesse de déformation plastique  $\dot{\epsilon}_{ij}^p$  est supposé être la somme de la vitesse de déformation plastique  $\dot{\epsilon}_{ij}^{pslip}$  induite par déformation de glissement dans l'austénite et la martensite, de  $\dot{\epsilon}_{ij}^{ptrans}$  et la vitesse de déformation induite par la transformation martensitique, Ce dernier peut être décomposé en deux termes : une partie dévia torique,  $\dot{\epsilon}_{ij}^{pshape}$  associé au changement de forme et une partie de dilatation  $\dot{\epsilon}_{ij}^{pdilat}$  qui exprime le changement de volume Eq[ III.5]

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\epsilon}_{ij}^{pslip} + \dot{\epsilon}_{ij}^{ptrans} = \dot{\epsilon}_{ij}^{pslip} + \dot{\epsilon}_{ij}^{pshape} + \dot{\epsilon}_{ij}^{pdilat} \quad (III.5)$$

Iwamoto et AUTRE [III.6] ont effectué les tests de traction et de compression uniaxiale avec acier inoxydable 304 austénitique et a prouvé que les courbes de contrainte-déformation en traction et en compression de l'austénite et la martensite dans l'acier TRIP sont asymétriques. D'autre part, MILLER et Mc DOWELL [III.7] a proposé la fonction de rendement,  $y$  compris le 3ème invariant de la contrainte dévia torique  $J_3$  pour exprimer l'asymétrie des courbes contrainte – déformation en traction et en compression dans l'acier inoxydable austénitique en raison du développement des microstructures sans la transformation de phase.

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

---

Pour décrire le résultat expérimental rapporté par IWAMOTO et AUTRE [III.6], la fonction du rendement incluant  $J_3$  est donnée par Eq [III.6]:

$$F = J_2 - k \frac{J_3}{J_2^{1/2}} - \frac{1}{3} \bar{\sigma}^2 = 0 \quad (\text{III.6})$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (\text{III.7})$$

$$J_3 = \det |S_{ij}| \quad (\text{III.8})$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2 - k \frac{J_3}{J_2^{1/2}}} \quad (\text{III.9})$$

$S_{ij}$  Est le tenseur déviatorique de la contrainte de Cauchy Eq [III.7] et  $\bar{\sigma}$  est la contrainte équivalente Eq [III.8] ,  $k$  est le paramètre qui reflète le développement de microstructures à l'intérieur du matériau, tel que la texture. La forme simplifiée de l'équation d'évolution proposée par MILLER et Mc DOWELL [III.7] est utilisé comme indiqué dans Eq [ III.10].

$$\dot{k} = C_k (1 - k) \dot{\bar{\epsilon}}^{pslip} \quad (\text{III.10})$$

Où

$C_k$  est une constante,

$\dot{\bar{\epsilon}}^{pslip}$  est la vitesse de déformation plastique équivalente de la déformation par glissement dans un acier trip SIERRA et AUTR [III.5] ont ignoré, dans leur étude, l'évolution de la texture de l'acier TRIP afin de parvenir a simplifier la condition de rendement. Le comportement asymétrique est pris en compte dans l'état de contrainte dépendant du paramètre  $\eta$ . SERRI et AUTRE [III.8] ont introduit une loi de contrainte-déformation équivalente  $\bar{\sigma}_{am}(\dot{\bar{\epsilon}}^{pslip})$  Eq [III.13] pour le matériau à deux phases contenant la fraction

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

---

volumique instantanée de martensite,  $f^m$ . Représente La loi de contrainte-déformation effective est approximée à l'aide d'une règle de mélanges.

Avec cette simplification ajoutée, la condition de rendement est donnée par Eq [III.11]

$$F = \bar{\sigma} - \bar{\sigma}_{am} \quad (\text{III.11})$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2} \quad (\text{III.12})$$

$$\bar{\sigma}_{am} = f^m \sigma_m(\bar{\epsilon}^{pslip}) + (1 - f^m) \sigma_a(\bar{\epsilon}^{pslip}) \quad (\text{III.13})$$

où les indices **a** et **m** se réfèrent respectivement aux phases austénitique et martensitique.

$\sigma_m$  et  $\sigma_a$  sont la contrainte-déformation effective des phases austénitique et martensitique Eqs [III.14-III.15]:

$$\sigma_m = \sigma_{ym} + c_{1m} \left\{ 1 - \exp(-c_{2m} \bar{\epsilon}^{pslip}) \right\}^{c_{3m}} \quad (\text{III.14})$$

$$\sigma_a = \sigma_{ya} + c_{1a} \left\{ 1 - \exp(-c_{2a} \bar{\epsilon}^{pslip}) \right\}^{c_{3a}} \quad (\text{III.15})$$

où les contraintes d'écoulement  $\sigma_{ym}$  et  $\sigma_{ya}$  sont fonction de la température selon Eqs[ III.16-III.17]

$$\sigma_{ya} = c_{4a} \exp(-c_{5a} T) \quad (\text{III.16})$$

$$\sigma_{ym} = c_{4m} \exp(-c_{5m} T) \quad (\text{III.17})$$

L'acier TRIP subit un comportement élasto-plastique si la limite de rendement est égale à zéro.

$\dot{\epsilon}_{ij}^{pslip}$  est le tenseur de la vitesse de déformation plastique induite par la déformation par glissement. Sa formule est donnée par Eq [III.18]:

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

---

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pslip} = \dot{\bar{\epsilon}}^{pslip} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{III.18})$$

Où

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3S_{ij}}{2\bar{\sigma}}$$

$\dot{\epsilon}_{ij}^{pshape}$  et  $\dot{\epsilon}_{ij}^{pdilat}$  sont des tenseurs du taux de déformation plastique induit par transformation, le premier décrit le changement de forme, le second décrivent le changement de volume. Les formules pour les deux sont données dans Eqs [III.19-III.21]:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pshape} = R \dot{f}^m \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\text{III.19})$$

$$R = R_0 + R_1 \left( \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{ya}} \right) \quad (\text{III.20})$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pdilat} = \frac{1}{3} \Delta \dot{f}^m \delta_{ij} \quad (\text{III.21})$$

où  $R$  est un paramètre qui explique l'ampleur des changements de forme,  $R_0$  et  $R_1$  sont les suivants: constantes,  $\sigma_{ya}$  est la limite d'élasticité de la phase austénite mère, représente le changement de volume et  $\Delta f$  est la fonction delta de Knoecker.

### III-2 présentation du matériau utilisé :

Le matériau utilisé est un acier austénitique instable de type 304L (selon la norme AISI et X2CrNi18-9 selon AFNOR) est commercialisé sous forme de tôles minces d'épaisseur 3mm. Le (L) signifie que l'acier à une faible teneur en carbone. La principale propriété de ces aciers est leur excellente résistance à la corrosion.

Cette propriété donne au matériau une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux. A cette propriété fondamentale, s'ajoutent les caractéristiques mécaniques intéressantes comme la résistance mécanique, la ductilité et la ténacité.

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

### a) Composition chimique:

Le tableau(II.1) affiche la composition chimique de l'acier selon la fiche technique.

désignations	C	Cr	Ni	Si	Mn	p	N	S
Proportions	0.02	19.5	8.1	0.40	1.83	0.031	0.056	0.053

Le tableau III.1 : composition chimique de la tôle utilisé

### b) propriétés mécaniques:

Les détails des propriétés mécaniques sont donnés dans le tableau suivant:

E (Mpa)	R <sub>P0.2%</sub> (Mpa)	R <sub>m</sub> (Mpa)	A%
178178	374	693	60

Le tableau III.2 : propriétés mécaniques de l'acier TRIP 304L

## III-3 Simulation numérique d'emboutissage :

### III-3-1 Emboutissage de Swift :

Le poinçon et la matrice sont considérés comme corps rigides. Pour simuler le problème, différents déplacements ont été appliqués au point de référence du poinçon.

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.

## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

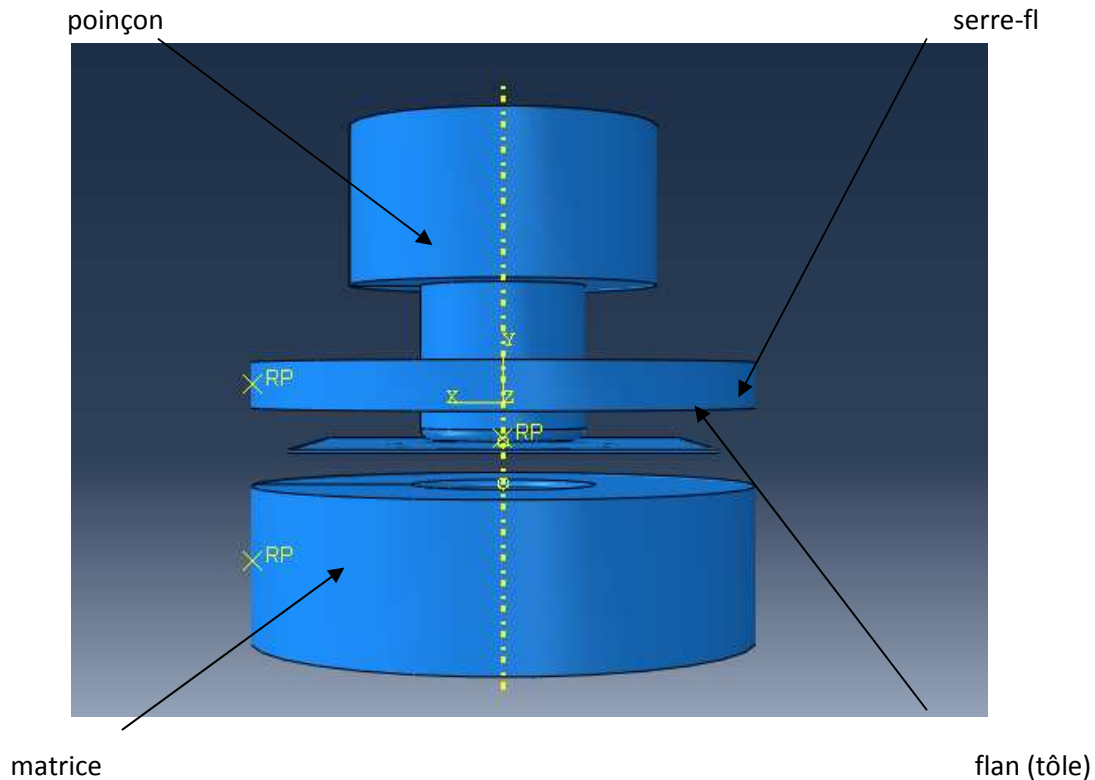


Figure III.1 : Schématisation de l'essai d'emboutissage simulée

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.

### III-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 rectangulaire (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 III.2. Nous en résumons les principales :



## Chapitre III : Application du procédé de mise en forme emboutissage-simulation numérique

- Diamètre extérieur matrice= 130mm
- Diamètre intérieur matrice =44mm
- Hauteur matrice = 30mm
- Rayon de raccordement matrice =2mm
- Diamètre extérieur serre flan = 130mm
- Diamètre intérieur serre flan = 44mm
- Hauteur serre flan= 10.7mm
- Diamètre poinçon = 43mm
- Rayon de raccordement poinçon = 1.5mm , 3mm
- éprouvette rectangulaire de dimension =100 mm
- Epaisseur du flan=1.5mm , 0.5mm

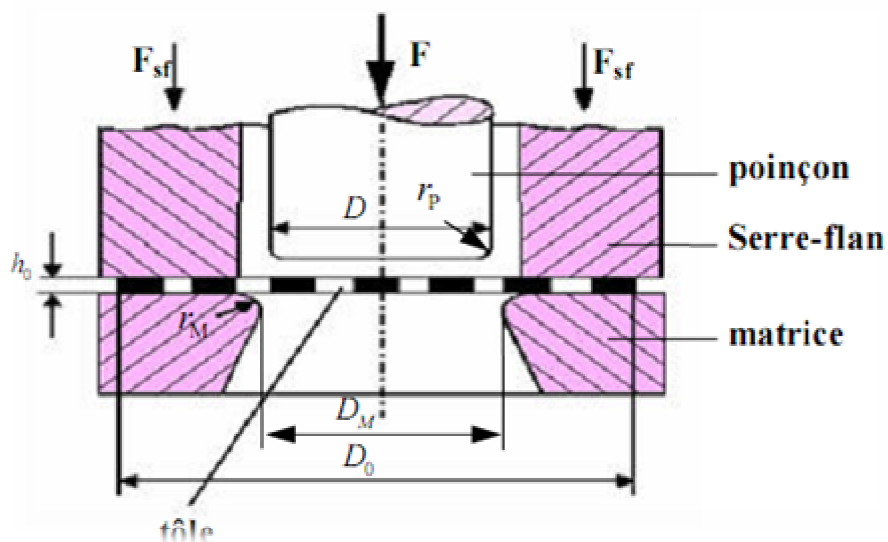


Figure III.2 : dimensions de l'outillage et du flan

### III-3-3 Les conditions aux limites :

La simulation a été réalisée dans ce cas-ci en trois étapes. Les conditions principales qui s'imposent dans la première étape sont: la matrice et le serre-flan doivent être fixés (les déplacements et les rotations sur toutes les directions doivent être nulles), on applique une vitesse de 10 mm/min sur le point de référence du poinçon sur la direction 2, les déplacements et les rotations sur les autres directions étant nulles, figure III.3 .

## Chapitre III : Application du procédé de mise en emboutissage-simulation numérique

---

Dans la deuxième étape on garde les conditions imposées à la matrice. Dans cette étape-ci on applique une vitesse de 15 mm/min dans le noyau du poinçon.

puis la dernière étape on a augmenté seulement la vitesse appliquée au noyau du poinçon jusqu'à 20 mm/min

vitesse 10mm/min

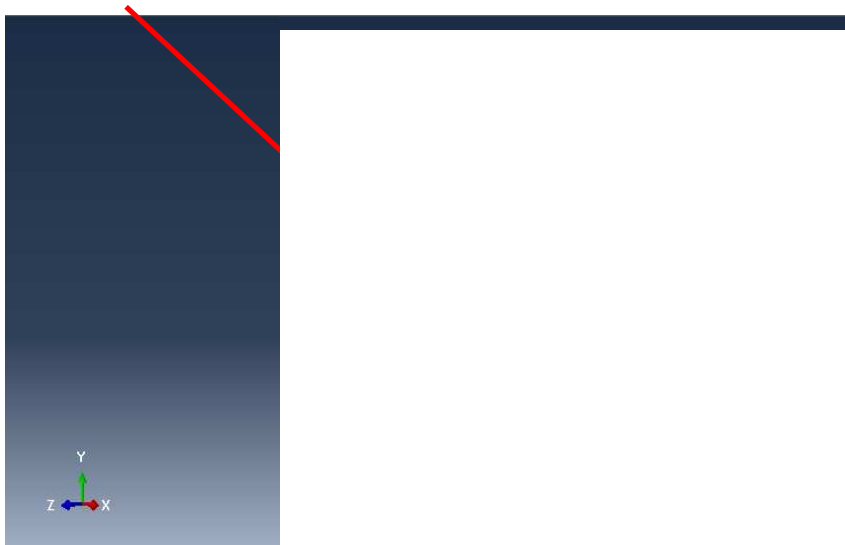


Figure III.3 : représentation des conditions aux limites

### III-3-4 Le maillage :

Le maillage de l'éprouvette influence les résultats par le fait que pour de très grandes 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 augmente fortement avec le nombre des éléments. La discrétisation de l'éprouvette doit être faite avec un compromis entre le temps de calcul qui doit être raisonnable, le nombre d'éléments qui doit être suffisant pour donner le plus réellement possible les déformations de la pièce emboutie.

ERROR: IOError  
OFFENDING COMMAND: image

STACK:

## *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.

# 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 rectangulaire : 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).

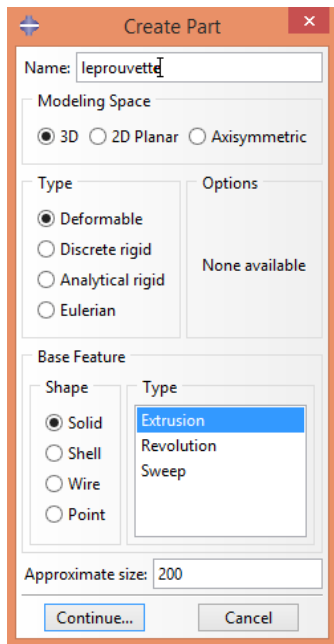
Dans le module **Part** créer les deux parties en allant dans le menu **Part>create** (ou en

cliquant sur )

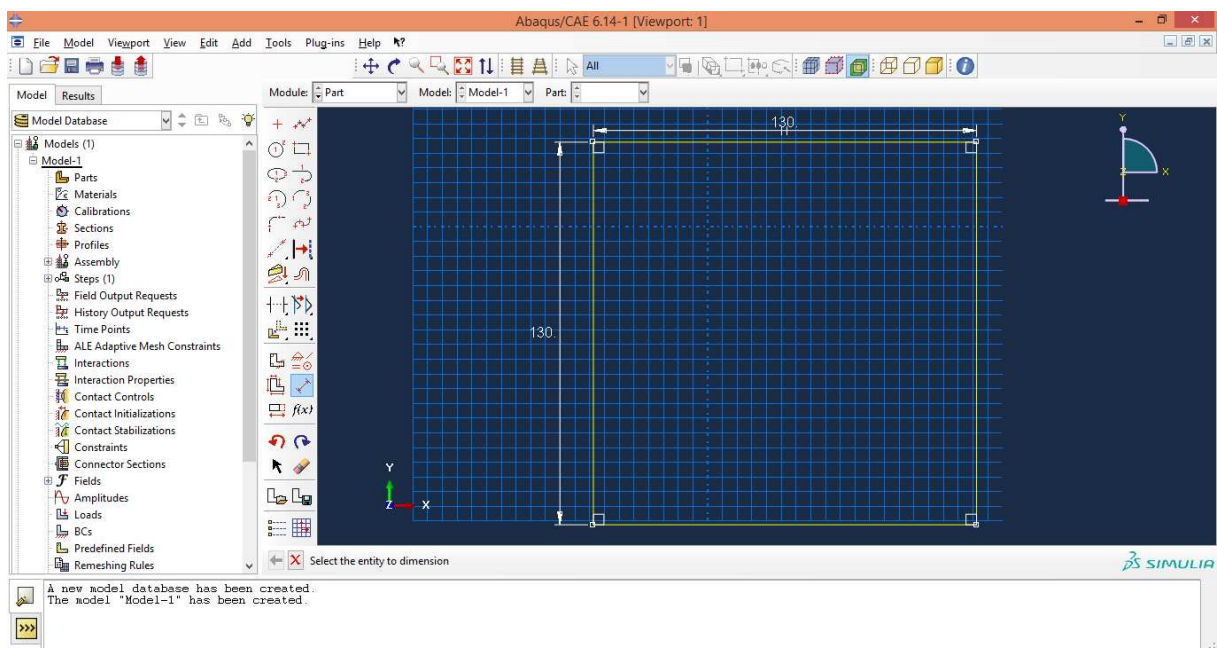
### ➤ Pour l'éprouvette :

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

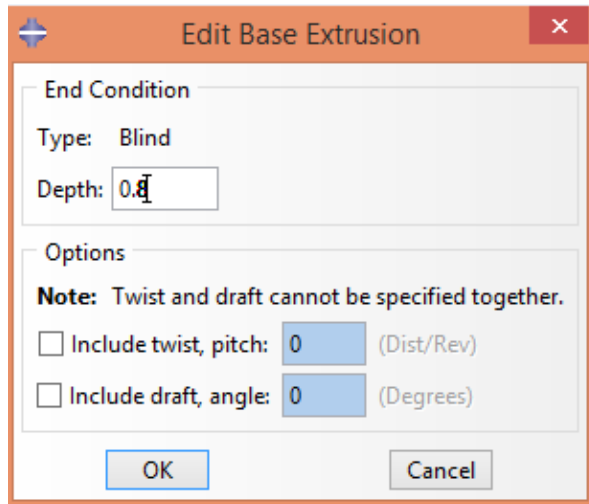
# Annexe



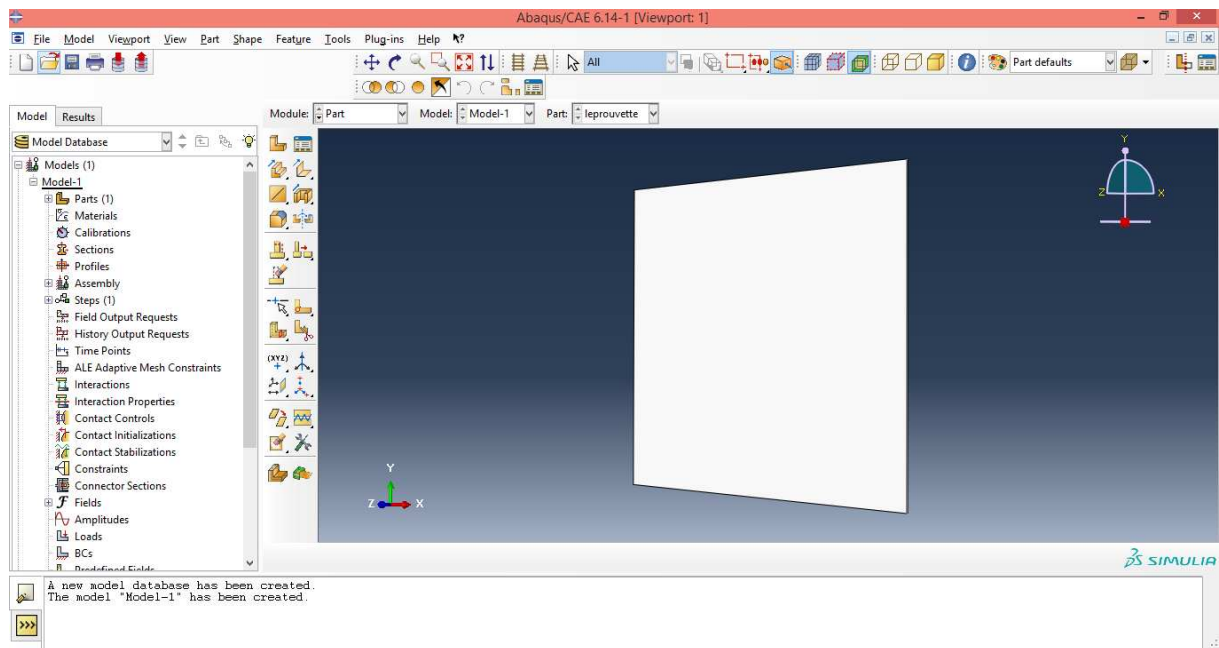
Cliquez sur **Continue** pour dessiner l'éprouvette :



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 **Depht** (profondeur) entrez 0.8 :



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

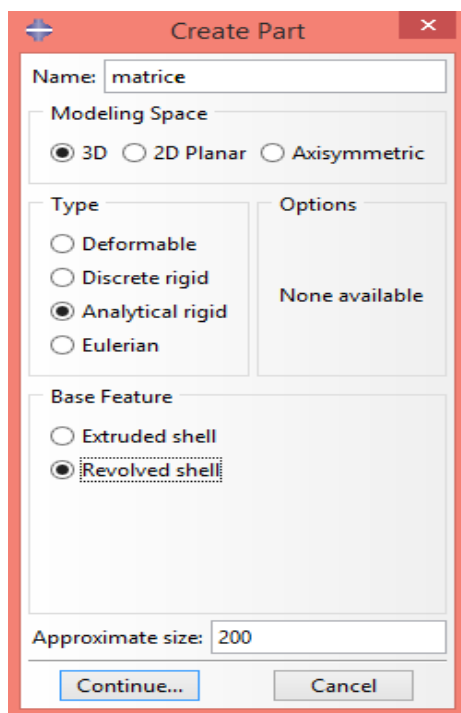


On passe maintenant à créer les corps rigides :

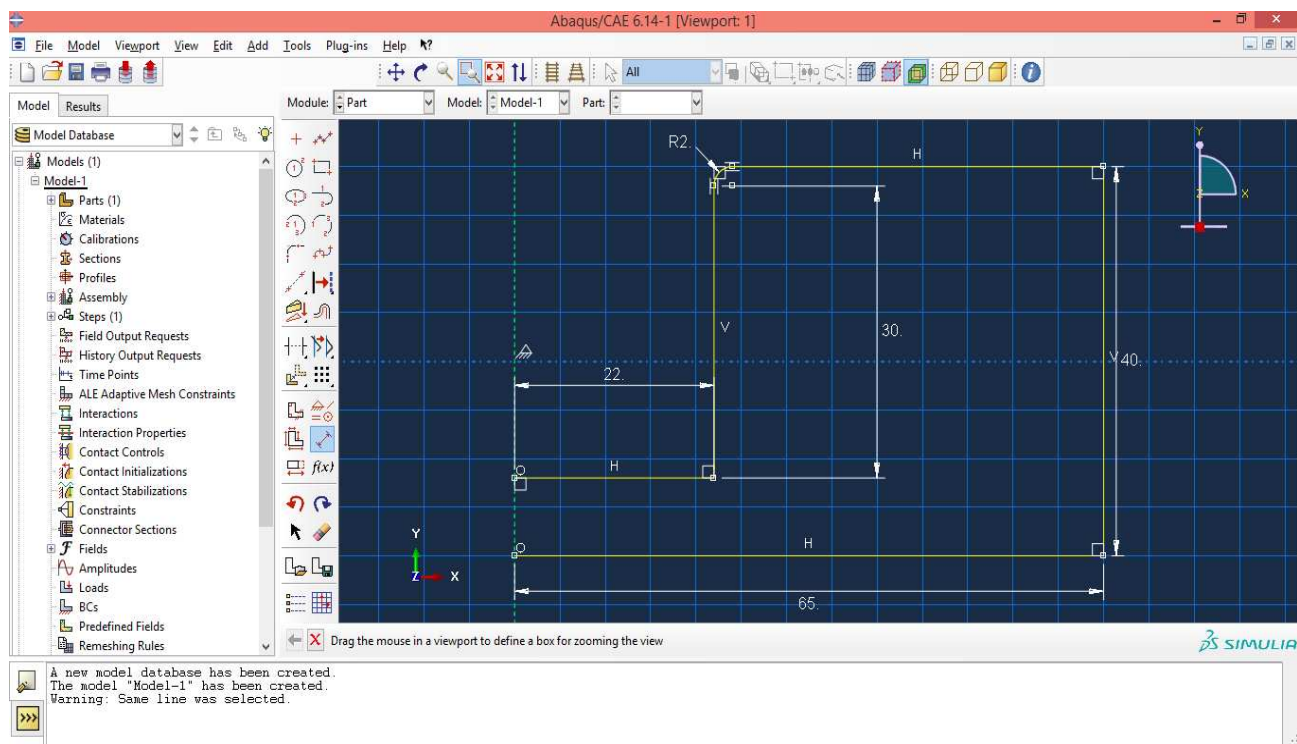
## 1. La matrice :

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

# Annexe



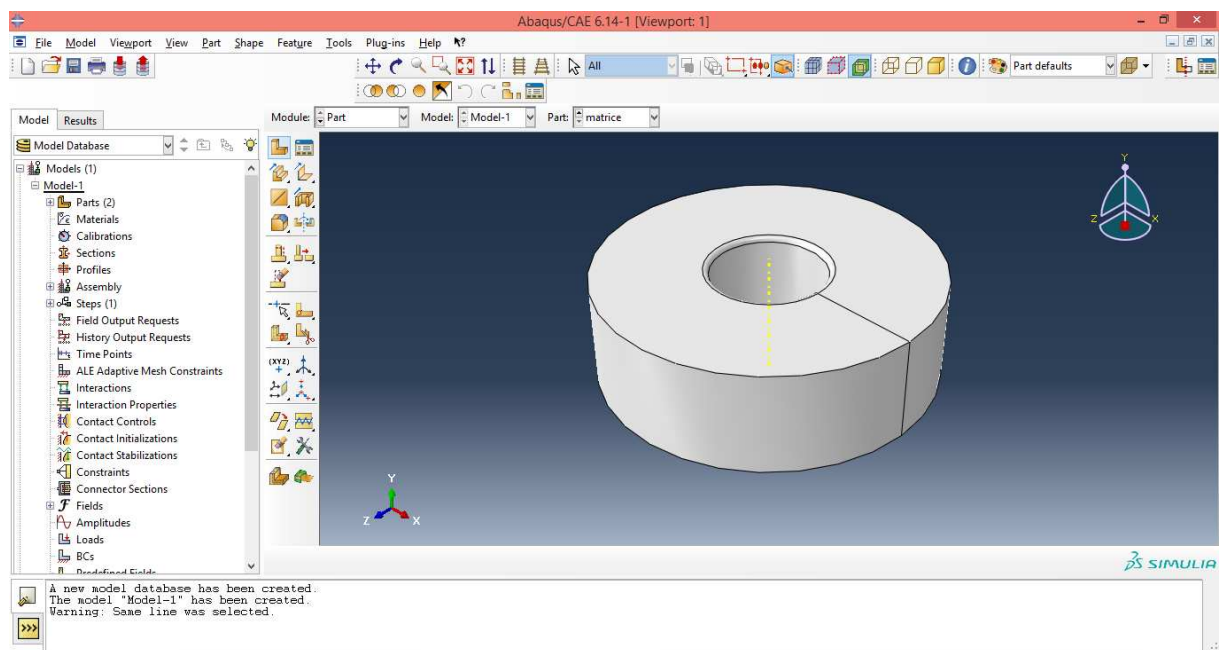
Appuyez sur **Continue** pour dessiner la matrice comme suit



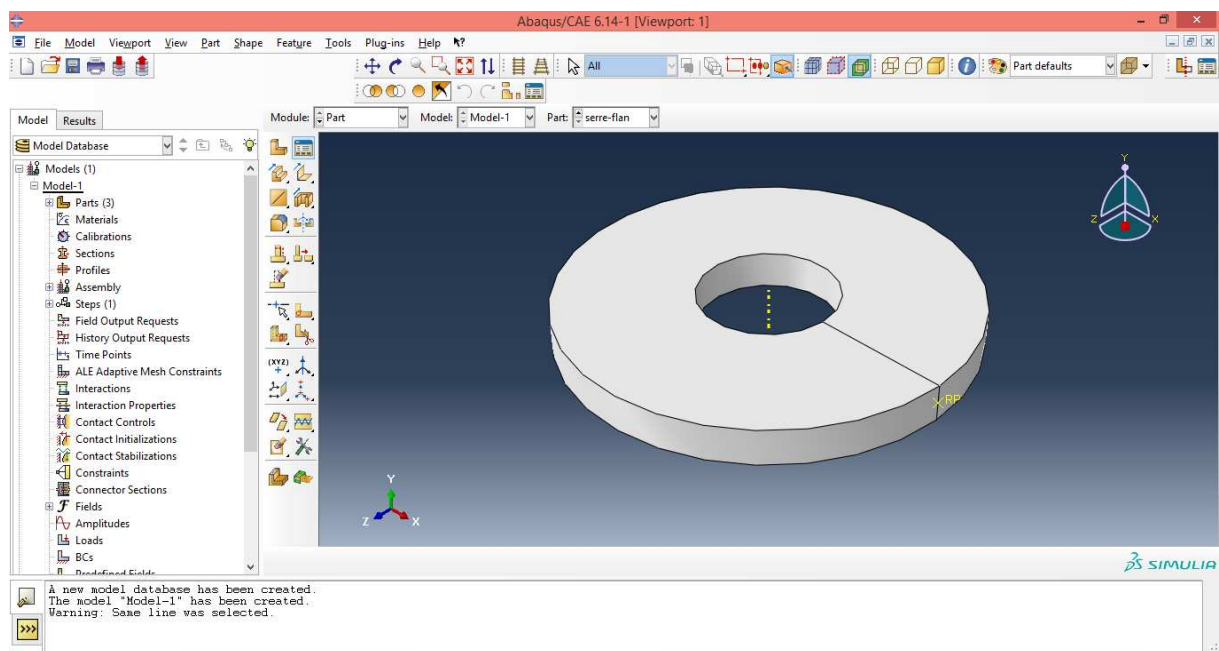
Cliquez sur **Done** pour avoir la forme finale comme suit :



# Annexe



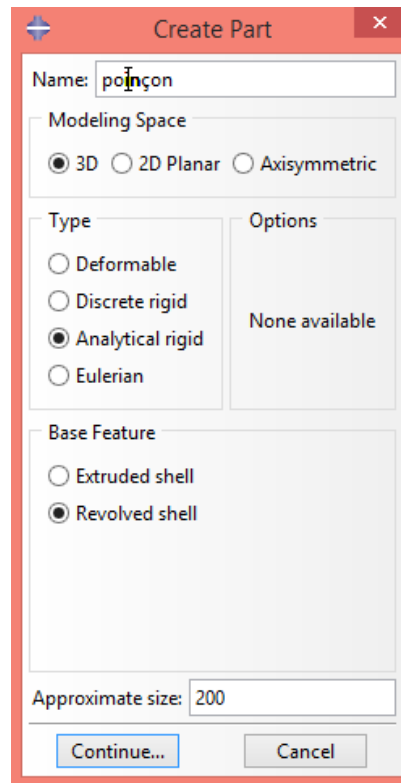
De la même façon créez serre-flan, leur forme finale est comme suit :



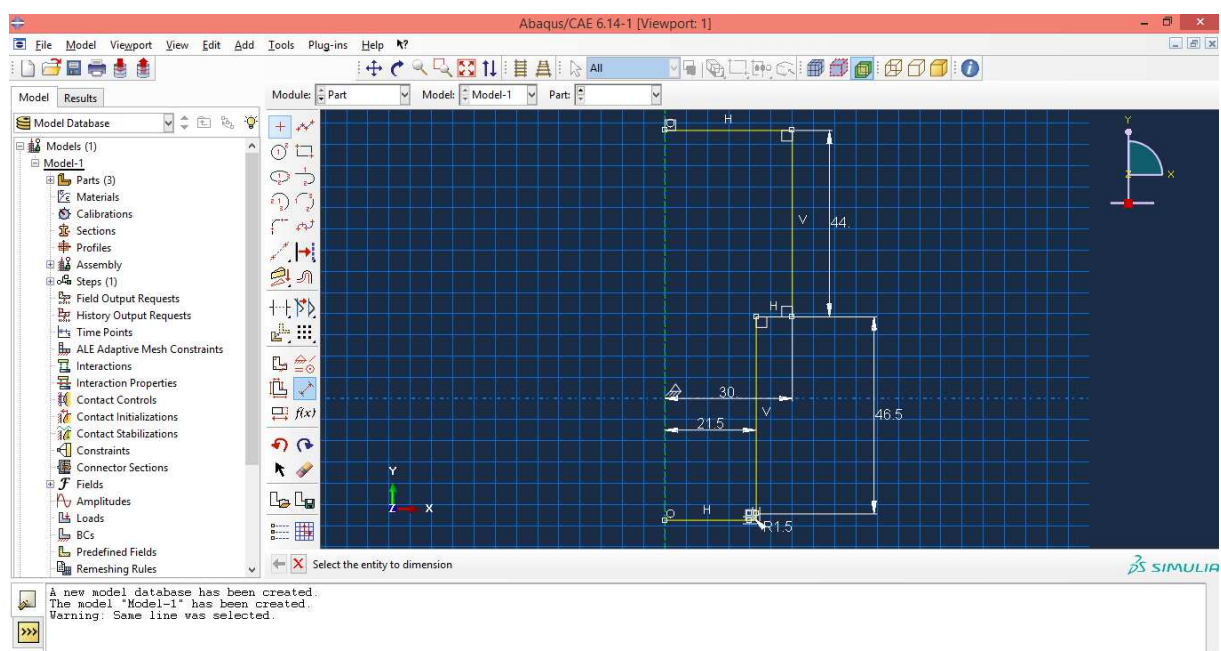
**Le poinçon :**

# Annexe

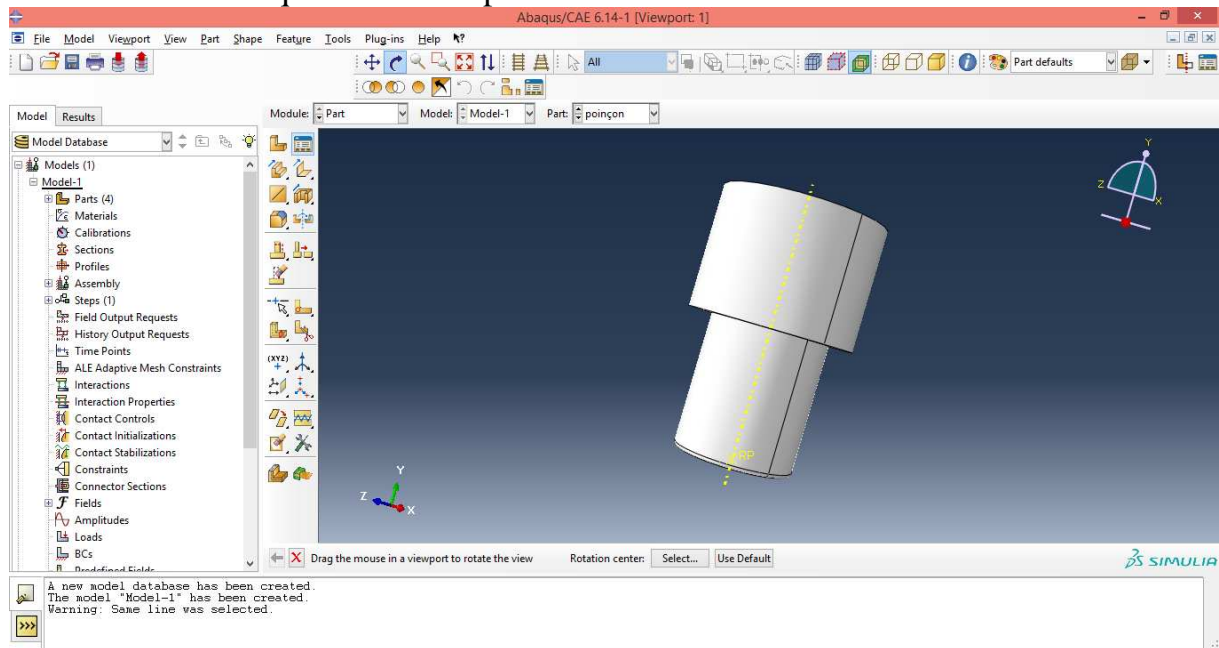
Cliquez sur **Part>create** comme l'étape précédente, et comme **Type** sélectionnez **Analytical rigid**, comme suit :



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 acier trip 304L

# Annexe

The image shows a software window titled "Edit Material". It contains a "Name" field with the text "acier trip 304L" and a "Description" field with a pencil icon. Below these is a "Material Behaviors" section with a large empty text area. At the bottom of this section are five tabs: "General", "Mechanical", "Thermal", "Electrical/Magnetic", and "Other". The "General" tab is selected. At the very bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

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 :

# Annexe

**Edit Material**

Name: acier trip 304L

Description:

**Material Behaviors**

- Elastic
- Density**

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

**Density**

Distribution: Uniform

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

**Data**

	Mass Density
1	0.00027

OK Cancel

✓ **M**achanical,elasticity,elastic puis entrez sa valeur comme suit :

## Annexe

**Edit Material**

Name:

Description:

**Material Behaviors**

- Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

**Elastic**

Type:  ▼ Suboptions

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Moduli time scale (for viscoelasticity):

☐ No compression

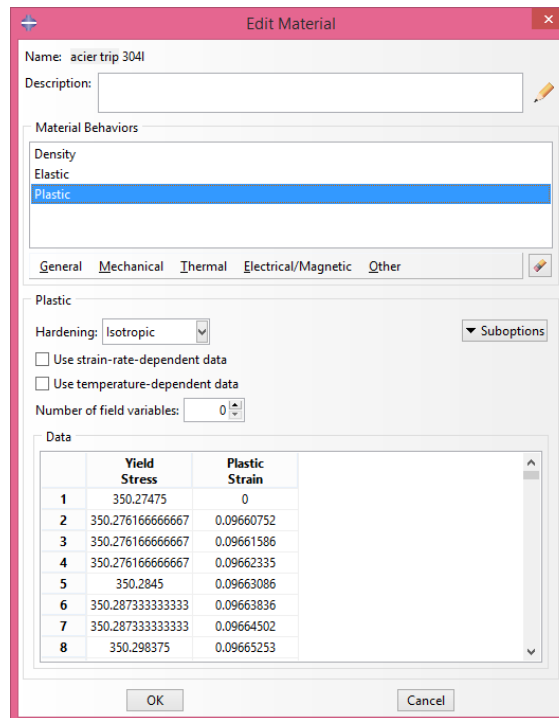
☐ No tension

**Data**

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	210000	0.3

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

# Annexe



## Remarque :

les constants du model d'iwamoto :

Mecanical constants :

1	193000	9	50	17	1023.9	25	0.0005
2	0.333	10	45	18	0.004		
3	298	11	0.02	19	1180.7		
4	-0.00019	12	0.02	20	17.8		
5	0.00024	13	0.02	21	7.66		
6	17.6	14	2084.2	22	1983		
7	-0.5	15	0.31	23	0.0059		
8	4.5	16	0.58	24	0.013		

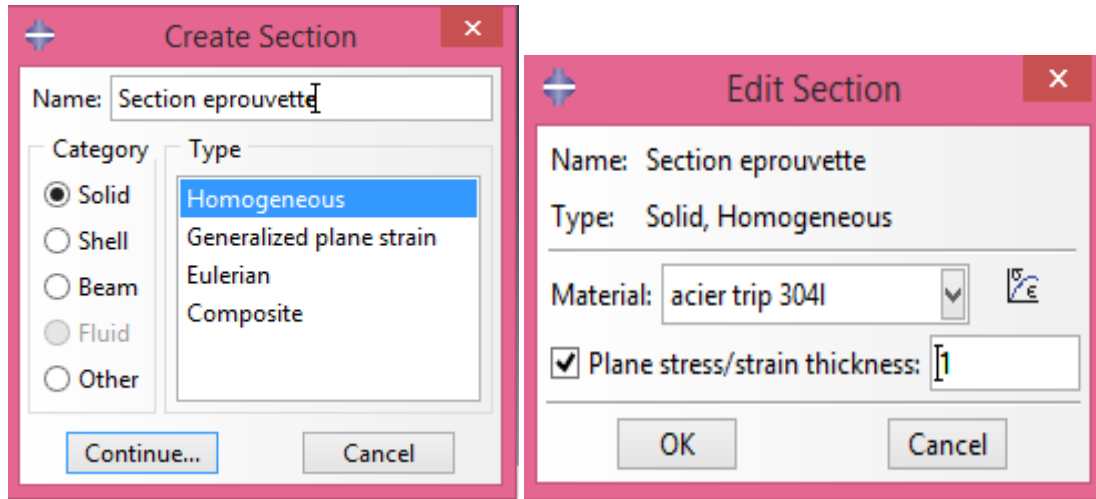
## III. Définir et affecter les propriétés de section :

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**).

## Annexe

3. Dans la fenêtre qui s'ouvre alors, sélectionnez **acier trip 304L** 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.

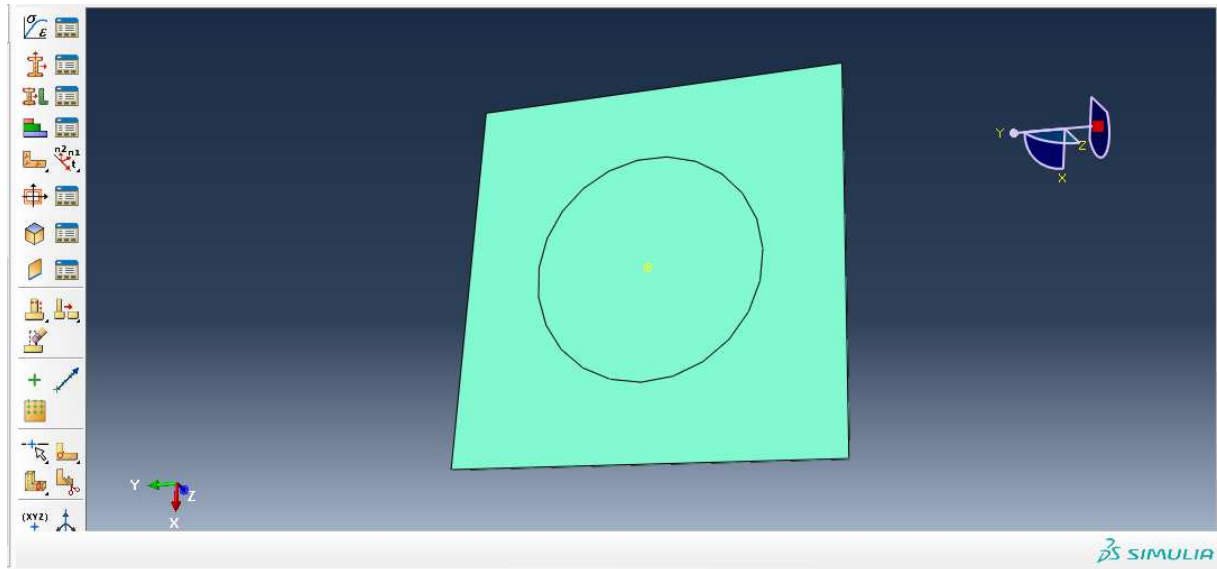
Validez votre choix (**M2** ou **Done**).

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.



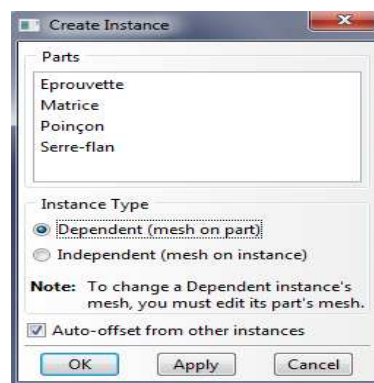
# Annexe



## 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

## Annexe

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.

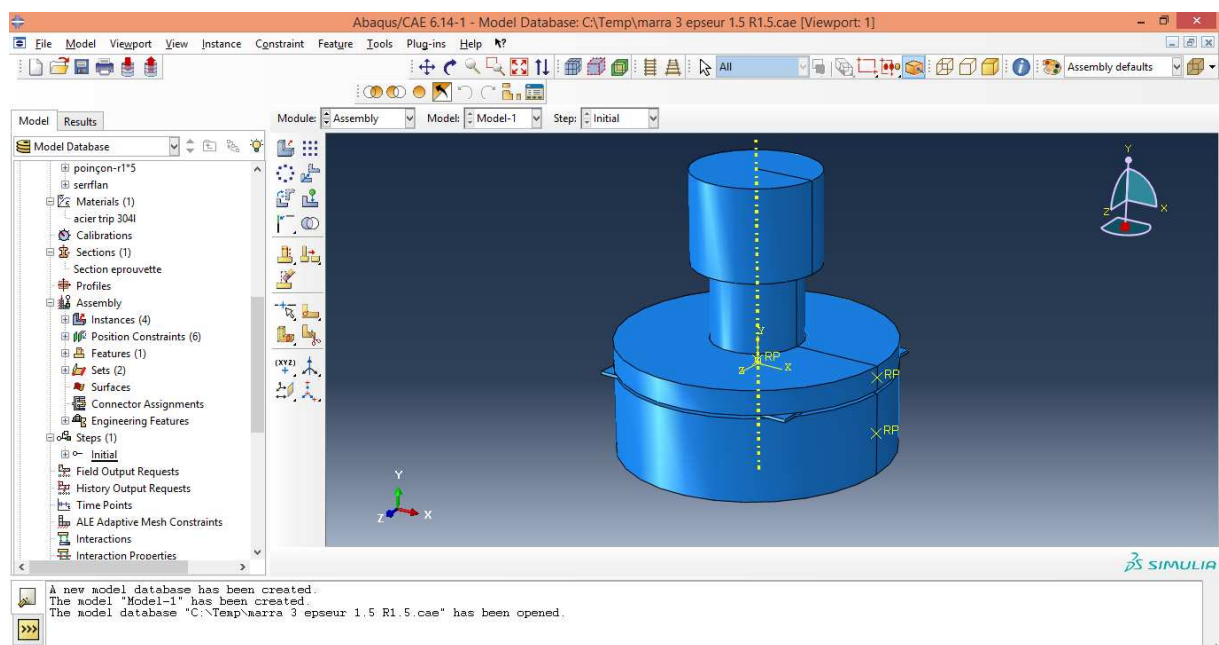
**Coaxial** : L'instance mobile bouge jusqu'à ce que les deux faces choisies soient coaxiales.

**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.

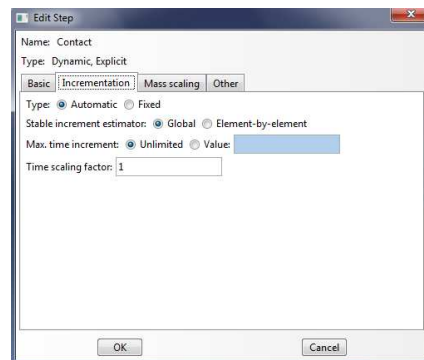
L'assemblage des objets créés est donné par l'image suivante :



## 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 1 seule pas d'analyse :

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.



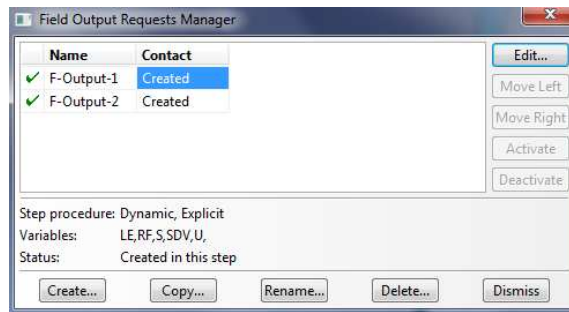
Lorsque l'on crée des pas d'analyse, ABAQUS inclut par défaut pour analyse les variables suivantes :

- 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)

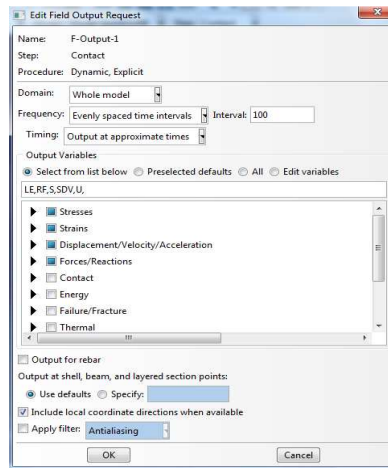
Maintenant nous voulons modifier ces variables :

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**.

# Annexe



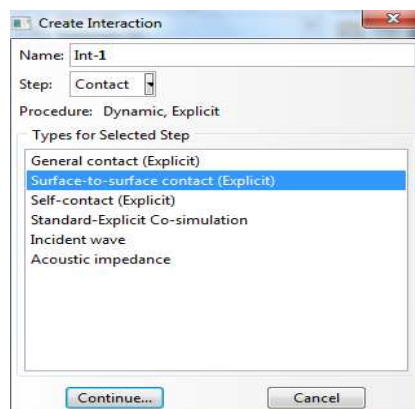
2. Allez dans les Contact, pour modifier les requêtes de sortie.



## VI. Définition des interactions :

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

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



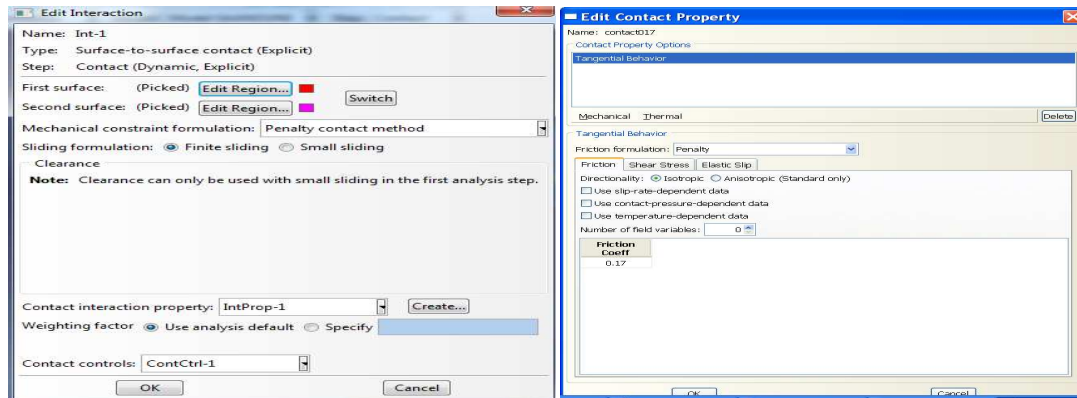
Cliquez sur continue, dans la fenêtre **Edit interaction** sélectionnez **Penalty contact method** dans **Mechanical constraint formulation**, pour définir les frottements entre les surfaces en contact. Pour cela cliquez sur **Créat** dans **Contact interaction property**, la

## Annexe

fenêtre **Edit contact property** va apparaitre, dans **Mechanical** sélectionnez **Tangential Behaviour** et dans **Friction formulation** sélectionnez **Penalty** et entrez la valeur 0.15 dans **Friction coeff.**

### Remarque :

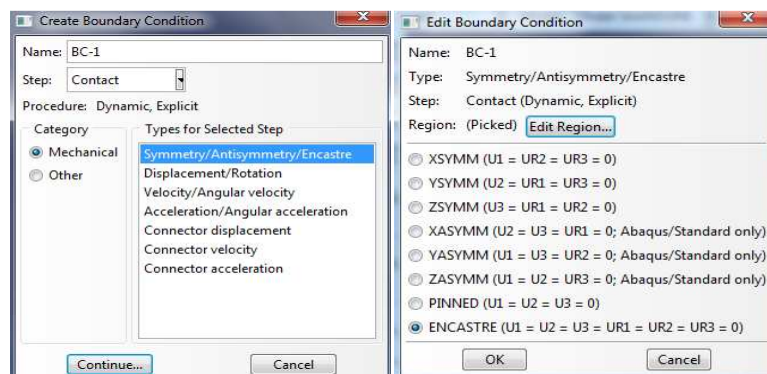
Le coefficient de frottement entre le poinçon et l'éprouvette est de 0.09.



1. Dans l'arbre, faites **M3** sur **BCs** et sélectionnez **Manager**. Créez une nouvelle condition limite. Nommez la **Fixe1**.

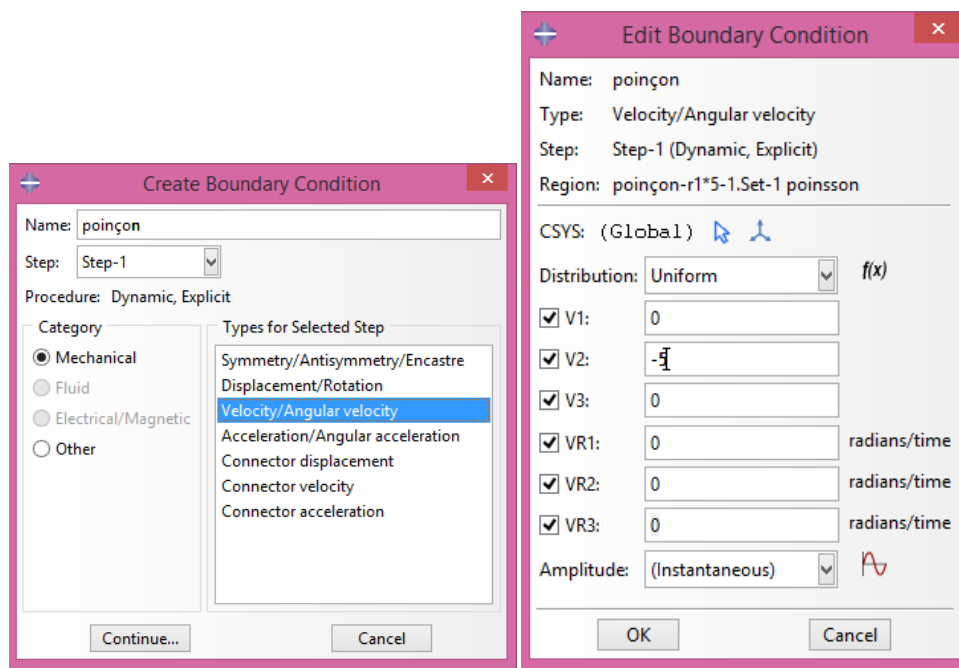
2. Sélectionnez comme type **Symmetry/Antisymmetry/Encastre** de condition limite. **Continue**. Sélectionnez le point de référence de la matrice. Cliquez sur **Done**. La fenêtre **Edit Boundary Condition** s'ouvre. Cochez **Encastre**.

Faites de même pour le serre-flan.

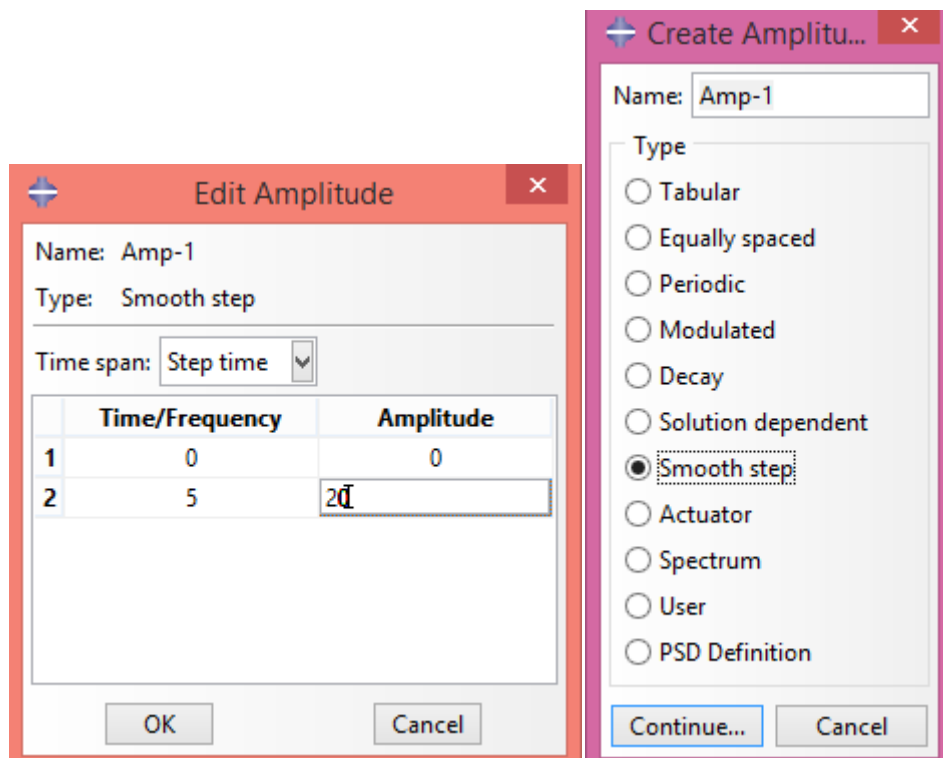


2. pour la troisième condition répétez l'étape 1, et pour l'étape2 sélectionnez comme type velocity/angular velocity cceptez la distribution **Uniform**, puis faites entrez les valeurs comme suit :

## Annexe



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

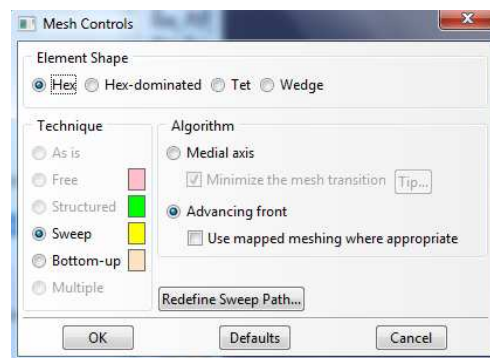


3. Les conditions aux limites créées sont comme suit:

## VIII. Maillage:

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

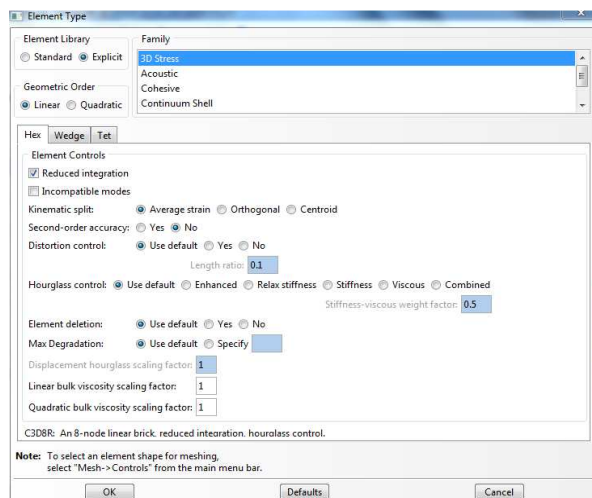
1. Dans le modèle sous **Parts**, tole, double cliques sur **Mesh** pour atteindre le module de maillage. Dans la barre de menu, allez dans **Mesh>Controls**, sélectionnez la tole, cliquez sur **Done**. La fenêtre **Mesh Controls** apparait cochez **Hex**. Les couleurs permettent de voir quelle technique 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** apparait. Dans **Element Library** sélectionnez **Explicit**. Pour **Geometric Order** cochez **linear**.



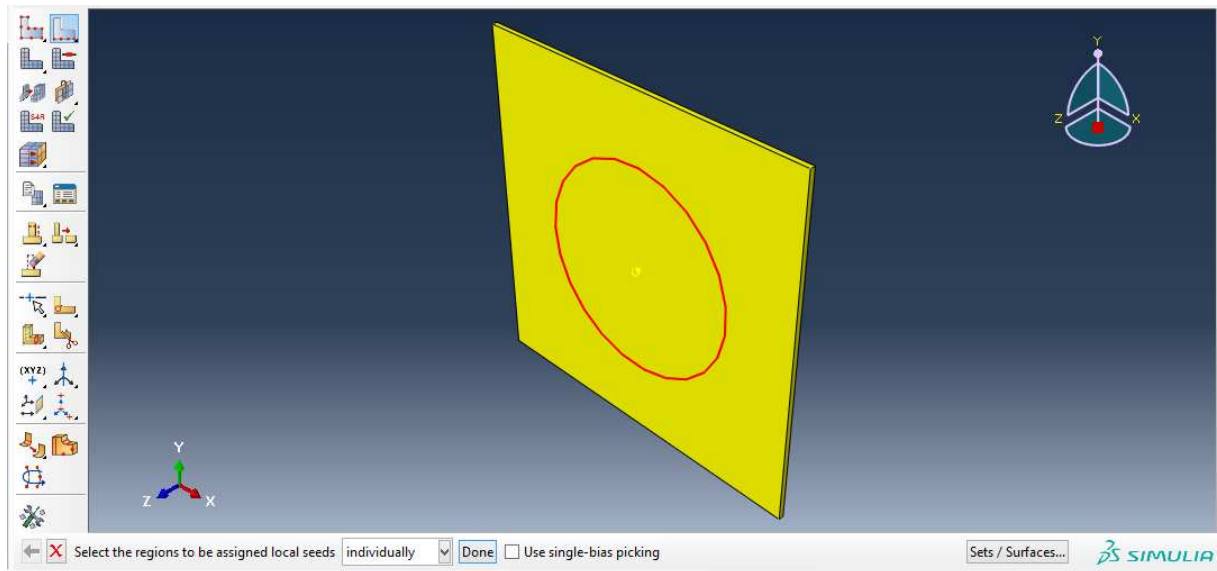
## Annexe

Cliquez sur **OK**.

Allez dans **part>sketch**



,Selectionnez une face puis une arrete ,Créez une cercle de rayon 30

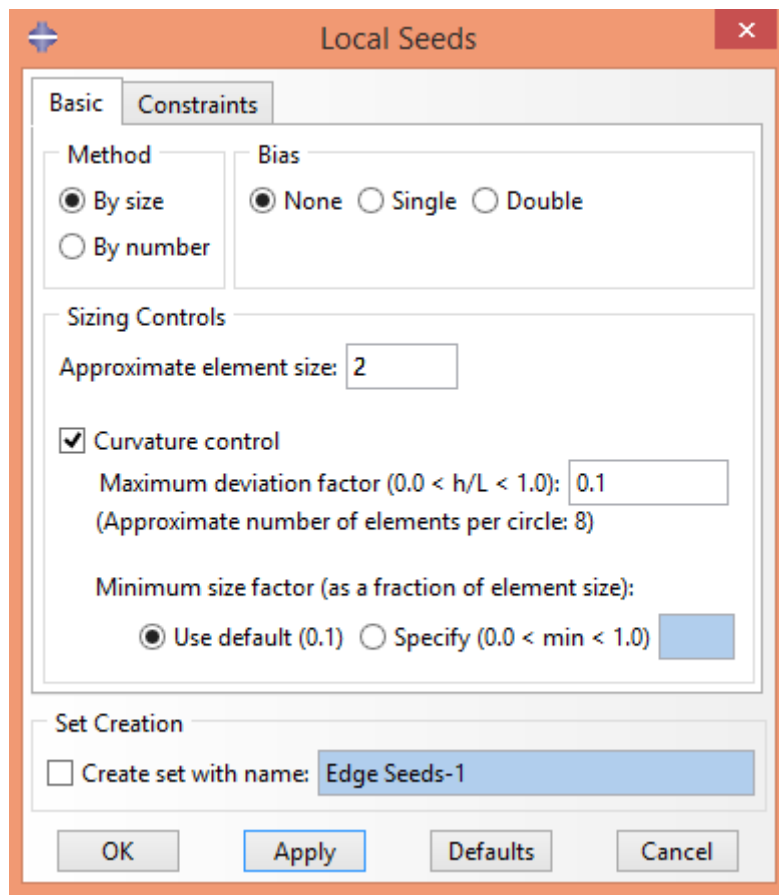


Cliquez sur **Done**

Allez dans **Seed edges**, sélectionnez la face circulaire, cliquez sur **Done**. La fenêtre **local Seeds** apparait. Dans **Approximate element Size** entrez la valeur .

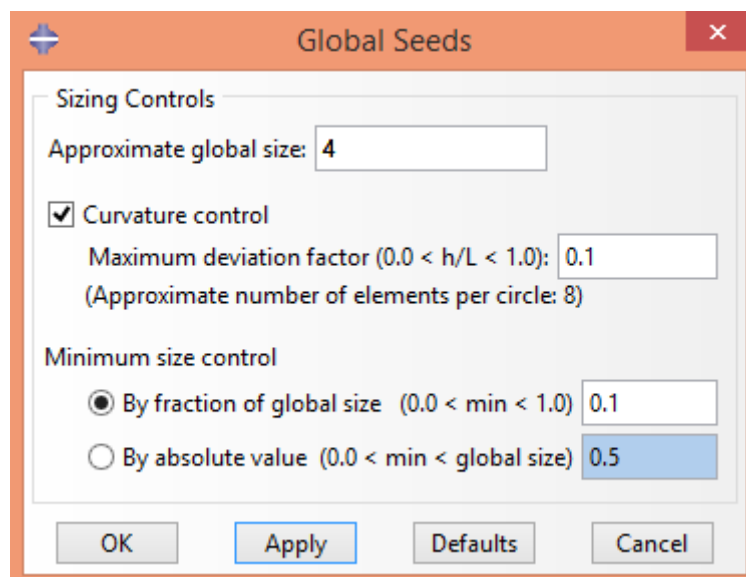


## Annexe

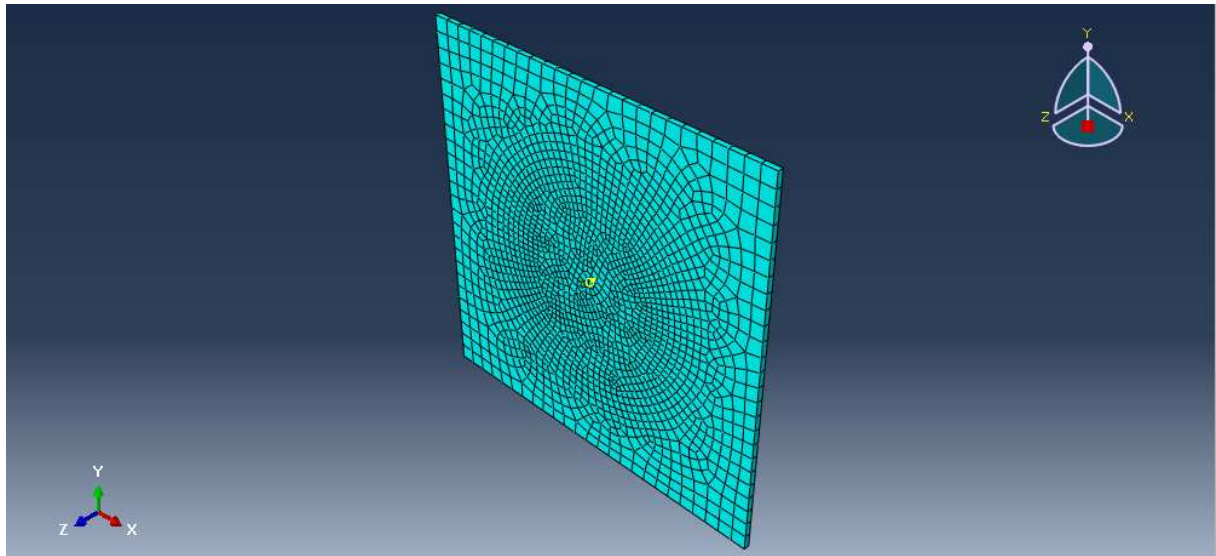


Cliquez sur **OK**.

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



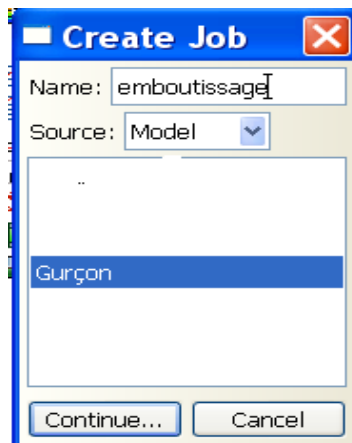
Allez dans **Mesh>Instance**, sélectionnez, cliquez sur **Done**.



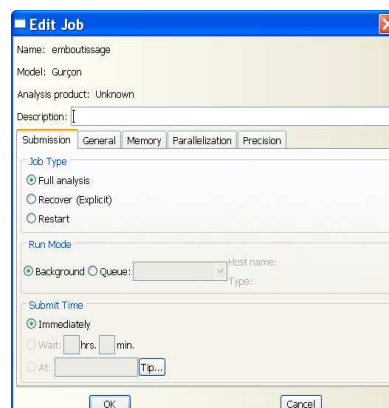
## XIII. Créer et soumettre un travail d'analyse

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**



# Annexe

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.

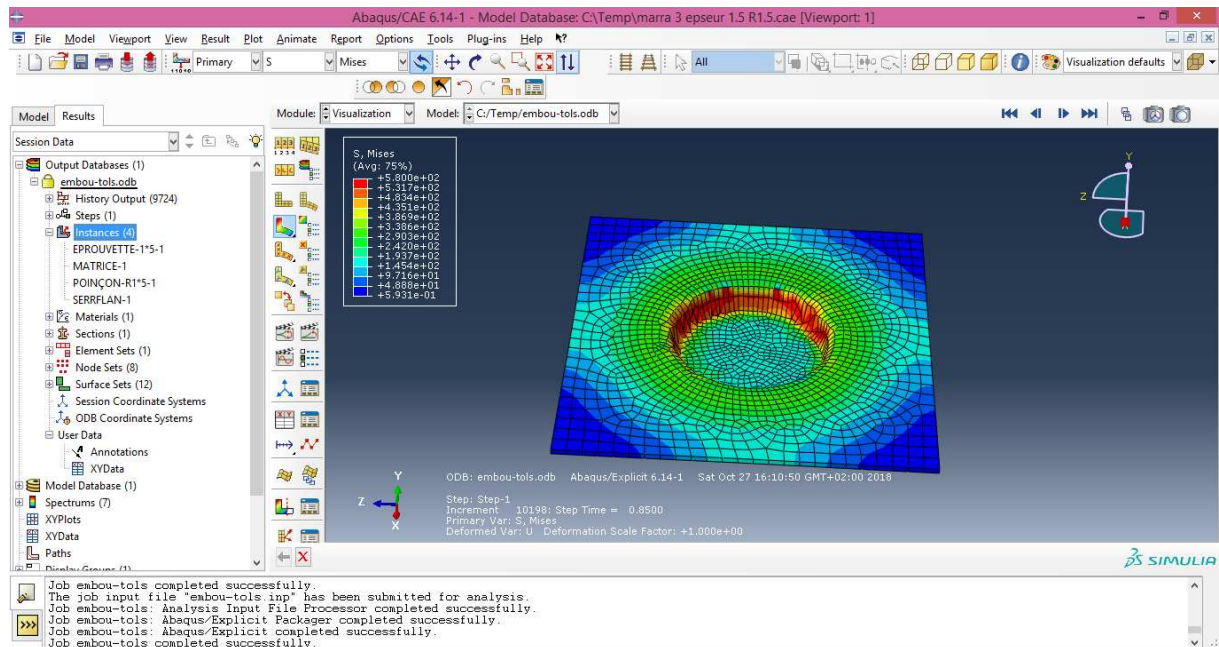
**Restart** : Lancer un job qui est la continuation d'une analyse précédente du modèle.

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.

## Les references :

- [I 1] : Mohamed Reda berrahmoun , transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austenitique instable 301ln2006.
- [I 2] : M. MARYA, K. WANG, L. G. HECTOR, X. GAYDEN. Tensile-shear forces and fracture modes in single and multiple weld specimens in Dual-Phase steels. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, pp. 287-298, Feb. 2006
- [I 3] : M. MARYA, X. Q. GAYDEN. Development of requirements for resistance spot welding Dual-Phase (DP600) steels Part 2 – Statistical analyses and process maps. Welding Journal, Vol. 84-s, N° 12, pp. 197-204, 2005.
- [I 4] : Arcelor Mittal, Aciers TRIP (TRansformation Induced Plasticity), 2012.
- [I 5] : A.A. Lebedev, « Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels », International Journal of Plasticity, Vol 16, (1999), pp. 749- 767.
- [I 6] : L.E. Murr, « Effect of strain state an strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel : Part II. Microstructural study », Metallurgical Transaction A, Vol 13A, (1982), pp. 627-635.
- [I 7] : R. Kubler, « Comportement thermomécanique des aciers à effet TRIP : Approches micromécaniques et phénoménologiques, applications à la mise en forme », Thèse de doctorat, ENSAM de Metz (2004).
- [I 8] : A.A. Lebedev, « Influence of phase transformations on the mechanical properties of austenitic stainless steels », International Journal of Plasticity, Vol 16, (1999), pp. 749- 767.
- [I 9] : M.P. Miller, D.L. McDowell, « The effect of stress stae on the large strain inelastic deformation behaviour of 304L stainless steel », Journal of Engineering and Material Technology, (1996), pp. 118-128.
- [I 10] : T. Iwamoto, T. Tsuta, y. Tomita, « Investigation on deformation mode dependence of strain-induced martensitic transformation in TRIP steels and modelling of transformation kinetics », International Journal of Mechanical sciences, Vol 40, (1998), pp. 173-182.
- [I 11] : R. Andersson, « Deformation characteristics of stainless steels », Thèse de doctorat, Division of manufacturing systems engineering, Luleå tekniska universitet (2005).
- [I 12] : Chung S.Y. et Swift H.W. (1951). Cup drawing from a flat blank — Part I and II. Proceeding of the Institute of Mechanical Engineering. 165, p. 199-223
- [I 13] : Nakazima K., Kikuma T., Hasuka K. (1968). Study on the formability of steel sheets. Yamata Technical Report, n°264, p. 141-154.
- [I 14] : Zoubair T. (1995). Simulation numérique de la mise en forme des tôles. Influence du

modèle de plasticité. Thèse de doctorat, l'Université Paul Verlaine de Metz.

[I 15] : Fromentin S. (1998). Etablissement d'un critère de striction intrinsèque des tôles et validation numérique par simulation d'emboutissage. Thèse de doctorat, l'Université Paul Verlaine de Metz.

[I 16] : Mesrar R. (1991). Comportement plastique des tôles sous sollicitation biaxiale et analyse numérique de la mise en forme par gonflement hydraulique. Thèse de doctorat, l'Université Paul Verlaine de Metz.

[I 17] : BRUNET M., MGUIL S. and MORESTIN F., Analytical and experimental studies of necking in sheet forming metal processes, *J. Mater. Process. Tech.*, 1998, n°80-81, 40-46.

[I 18] : Les aciers inoxydables, Editeurs scientifiques Lacombe P., Baroux B., Beranger G., les éditions de physique 1990.

[I 19] : HOURMAN T., rapport interne LEDEPP, 2001.

[I 20] : SUMITOMO H., Earing and delayed cracking of deep drawn cup of austenitic stainless steel sheets. *Advanced Technology of Plasticity*, 1978, vol II., pp 1289-1297.

[I 21] : HOURMAN, T., HOCHARD, J.L., MESS, G., rapport interne LEDEPP, 2000.

[I 22] : KUBLER R., Comportement thermomécanique des aciers à effet TRIP : approches micromécaniques et phénoménologiques applications à la mise en forme, 2004, thèse de doctorat, ENSAM de Metz.

[I 23] : GALLEE S., Caractérisation expérimentale et simulation numérique des procédés d'emboutissage profond application aux aciers inoxydables austénitiques, 2005, Thèse à l'université de Bretagne-sud.

[I 24] : GALLEE S., MANACH P.Y., THUILLIER S., PILVIN P. et LOVATO G., Development of a two-phase model for the deep-drawing of austenitic stainless steel, In : *Proceedings of Esaform 2004*, 199-202, Trondheim, Norway.

[I 25] : KEELER S.P., Determination of Forming Limits in Automotive Stampings, *Sheet Metal Indust*, 1965, 42, pp. 683-691.

[I 26] : HECKER S.S., Experimental studies of sheet stretchability, in: *Formability proceedings*, oct 1977, Chicago.

[I 27] : HECKER, S.S., STOUT, M.G., STAUDHAMMER, K.P., SMITH, J.L., Effects of strain state and strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel: Part I et Part II. *Met. Trans. A*, 1982, 13A, pp 619-635.

[I 28] : TALYAN V., WAGONER R.H., LEE J.K., Formability of Stainless Steel, *Metallurgical and materials transactions*, 1998, vol 29A, p. 2161-2172.

[I 29] : KANNI RAJ A., PADMANABHAN K.A., Prediction of the formability of metastable low nickel austenitic stainless steel sheets, Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94, p. 201-207.

[I 30] : KANNI RAJ A., PADMANABHAN K.A., Prediction of the formability of metastable low nickel austenitic stainless steel sheets, Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94, p. 201-207.

[I 31] : BARGUI, H., SIDHOM, H., TOURKI, Z., Martensite induite incidence sur le comportement en écrouissage et sur la limite de formage de l'acier inoxydable austénitique AISI304. Matériaux&Techniques, 2000, 11-12, pp3 1-41.

[I 32] : HECKER, S.S., STOUT, M.G., STAUDHAMMER, K.P., SMITH, J.L., Effects of strain state and strain rate on deformation induced transformation in 304 stainless steel: Part I et Part II. Met. Trans. A, 1982, 13A, pp 619-635.

[I 33] : Bargui H., Sidhom H. et Tourki Z. (2000). Martensite induite : incidence sur le comportement en écrouissage et sur la limite de formage de l'acier inoxydable austénitique AISI304. Matériaux & Techniques, 11-12, p. 31-41.

[I 34] : 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.

[I 35] : Cunat J.P, "Aciers inoxydables - Mise en oeuvre", Technique de l'ingénieur, M 4 542 - 1 - 24, Septembre 2000.

[II 1] : S. Kobayashi et J. Kim, Déformation analysis of axisymmetric sheet metal forming processes by the rigid plastic finite element method, Mechanics of Sheet Metal Forming, (Eds) D. P. Koistinen and N. M. Wang, Plenum press, New York, pp.:341, 1978.

[II 2] : N. M. Wang et B. Budiansky, Analysis of sheet metal forming by a finite element method, Journal of Applied Mechanics, ASME, 45, pp.: 73, 1978.

[II 3] : N. M. Wang, A rigid-plastic rate-sensitive finite element method for modelling sheet metal forming processes, Numerical analysis of Forming Processes, (Eds) J. F. T. Pitman, O. C. Zienkiewicz, R. D. Wood et J. M. Alexander, John Wiley & Sons Ltd, London, pp.: 117-164, 1984.

[II 4] : R. D. Wood, J. Bonnet et A. H . S. Wagadipura, Simulation of the superplastic forming of thin sheet components using the finite element method, NUMWORM'89, (Eds) Thompson, Balkema, Rotterdam, 1989.

[II 5] : M. Boivin, Prévision du retour élastique lors du pliage des tôles, Physique et Mécanique de la Mise en Forme des Métaux, Moussy et Franciosi, (Eds) Paris, CNRS, 1990.

[II 6] : E. Onâte et C. Agelet de Saracibar, Alternatives for finite element analysis of sheet metal forming processes, Proceedings of Numerical Method in Industrial Forming Processes, Chenot, Wood, Zienkiewicz (Eds), pp.: 78-88,1992.

- [II 7] : J.P. Picart, O. Ghouati, N. Boudeau, J. C. Gelin, Optimisation des paramètres de procédés de mise forme des matériaux avec minimisation de l'endommagement et de la striction localisée, 4<sup>ème</sup> Congrès de Calcul des Structures, D. Guédrà-Degeorges, P. Ladevèze et M. Raous, 18-21 mai, Giens, pp.: 355-360, 1999.
- [II 8] : J. Lemaitre et J. L. Chaboche, Mécanique des matériaux solides, Dunod, Paris, 19985
- [II 9] : C. H. Lee et S. Kobayashi, New solution to rigid-plastic deformation problems using a matrix method, Journal of Engineering Industries, ASME, 95, pp.: 865, 1973.
- [II 10] : M. Gotoh et F. Ishise, A finite element analysis of rigid-plastic deformation of the flange in a deep drawing process based on fourth-degree yield function *I*, International Journal of Mechanical Sciences, 20, pp.: 423, 1978.
- [II 11] : M. Gotoh, A finite element analysis of rigid-plastic deformation of the flange in a deep drawing process based on fourth-degree yield function *II*, International Journal of Mechanical Sciences, 22, pp.: 367, 1980.
- [II 12] : O. C. Zienkiewicz, P. C. Jean et, E. Onate, Flow of solids during forming and extrusion, some aspect of numerical solutions, Solids and Structures, 14, pp.: 15, 1978.
- [II 13] : M. Brunet, Modélisation numérique par éléments finis d'un emboutissage profond, Ecole d'été d'Oléron, dirigé par F. Moussy et P. Franciosi, (Eds ) Paris, CNRS, pp.: 516-521, 1990.
- [II 14] : Y. Germain, Modélisation par éléments finis d'écoulement viscoplastique avec frottement - Application au forgeage à chaud. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Mines de Paris, 1985.
- [II 15] : W. C. Zhang, R. D. Wood et O. C. Zienkiewicz, Superplastic forming analysis using a finite element viscous flow formulation, Aluminium Technology'86, The institute of metal, London, 4, pp.: 111.4-111.6, 1986.
- [II 16] : J. C. Gelin, L. Boulman, et P. Boisse, Quasi-static implicit transient analyses of sheet metal forming using a CO three node shell element, Journal of Material Processing Technology, 50, 1-40, pp.: 54-69, 1995.
- [II 17] : Batoz, P. Duroux, Y. Q. Guo et J. M. Detraux, An efficient algorithm to estimate the large strains in deep-drawing, NUMIFORM'89, Balkema, pp.: 383-388, 1989.
- [II 18] : J. L. Batoz, Y. Q. Guo et F. Mercier, The inverse approach including bending effects for the analysis and design of sheet metal forming parts, NUMIFORM'95, Balkema, pp.: 661-667, 1989.
- [III 1] R. Sierra and J. A. Nemes, "Investigation of the mechanical behaviour of multi-phase TRIP steels using finite element methods", International Journal of Mechanical Sciences, 50 649–665, (2008).
- [III 2] J. Serri, M. Martiny and G. Ferron, "Finite element analysis of the effects of martensitic phase transformation in TRIP steel sheet forming". International Journal of Mechanical Sciences, 47, 884–901, (2005).
- [III 3] T. Iwamoto and T. Tsuta, "Finite element simulation of martensitic transformation in single-crystal TRIP steel based on crystal plasticity theory with cellular automata approach", Key Engineering Materials, (274–276), 679–684, (2004).



**[III 4]** T.IwamotoandY. Tomita, “Constitutive modelling of TRIP steel and its applications to the improvement of mechanical properties”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 37, 1295–1305, (1995).

**[III 5]** J. F. Breedis and L. Kaufman, *Met. Trans.*, 2, 2359, (1971).

**[III 6]** J.C.Nagtegaal, “On the implementation of inelastic constitutive equations with special reference to large deformation problems”, *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.*, 33, 469-484, (1982).

**[III 7]** J.C. Simo and R.L. Taylor, “A return mapping algorithm for plane stress elastoplasticity”, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 22, 649-670, (1986).

**[III 8]** T.Iwamoto, T.Tsutaand Y.Tomita, “Investigation on deformation mode dependence of strain-induced martensitic transformation in TRIP steels and modeling of transformation kinetics”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 40 (2–3),173–182, (1998).