



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire

de fin d'études

*En Vue De L'obtention Du Diplôme Master Académique En
Génie Mécanique*

Option : Comportement Et Mise En Forme Des Matériaux.

Thème :

**Modélisation Et Optimisation De La Mise En
Forme Des Matériaux Application Au
Laminage**

Proposé et dirigé par :

M^r: M.ALMANSBA

Présenté par :

M^r: Stiti Meziane

Promotion : 2012/2013

REMERCIEMENTS

***Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de Près ou de
Loi, à la réalisation de ce modeste travail.***

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

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

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

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

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

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

Liste des notations et des symboles

- e : Déformation totale
- ε_e : Déformation élastique
- ε_p : Déformation plastique
- $\vec{n}$: La normale à la surface
- s : Contrainte
- I : Tenseur identité
- λ_{pl} : multiplicateur plastique
- f : Fonction de la surface de charge
- $\vec{V}$: La vitesse
- $\tilde{s}$: Contraintes effectives
- F_p : Potentiel plastique
- σ_{eq} : Contrainte équivalente
- σ_0 : La limite d'écoulement
- P_H : Partie hydrostatique de $\underline{\sigma}$
- $\tilde{\underline{\sigma}}$: Le tenseur des contraintes effectives
- $\underline{\alpha}$: Ecrouissage cinématique
- r : Ecrouissage isotrope
- X : Le tenseur d'écrouissage cinématique
- b : Coefficient d'écrouissage isotrope non linéaire
- a : Coefficient d'écrouissage cinématique non linéaire
- Q : Module d'écrouissage isotrope
- c : Module d'écrouissage cinématique
- $\tilde{Q}$: Modules d'écrouissage isotrope endommagé
- S : Surface de charge
- C_0 : Coefficient de proportionnalité
- D_n : La variable d'endommagement
- S_D : La surface résultant des défauts
- S : La surface total à la normale $\vec{n}$
- r : La densité du matériau
- V : le volume du domaine
- $\vec{f}$: Force volumique

Liste des notations et des symboles

$\vec{t}$: Forces surfacique

« f » : Fraction volumique des cavités

f^* : La fonction de porosité fictive

δ : représente l'accélération de la croissance de porosité

f_c : La fraction volumique critique de vides

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

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

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

V_c : Le volume des cavités

V_0 : Le volume de la matrice sans cavités

$\underline{\underline{\Lambda}}$ et $\underline{\underline{\tilde{\Lambda}}}$ Sont respectivement les tenseurs de rigidité d'ordre quatre, en milieux sain et endommagé

$\underline{\underline{M}}$: L'opérateur d'effet du dommage d'ordre quatre

W_T : L'énergie totale

W_e : L'énergie élastique

W^b : L'énergie bloquée

$\underline{\underline{C}}$: Le module d'écrouissage cinématique

$\underline{\underline{N}}$: Le tenseur d'effet de dommage pour l'écrouissage cinématique

$\|\underline{\underline{D}}\|$: La norme appropriée de l'endommagement.

Y : Variable des forces thermodynamique

Ψ : L'énergie libre de Helmholtz

ψ_e : L'énergie libre élastique

ψ_p : L'énergie libre plastique

$\square$: Potentiel de dissipation

$\square_p$: Potentiel de dissipation plastique

$\square_d$: Potentiel de dissipation d'endommagement

S, s, Y et β représentent les paramètres de l'endommagement

(U) : Le vecteur champ de déplacement

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

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

Liste des notations et des symboles

$\vec{\delta \dot{u}}$: Champ de vitesses virtuelles

P_e : Puissance des efforts extérieurs

P_i : Puissance des efforts intérieurs

P_a : Puissance des efforts d'accélération

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

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

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

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

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

$[M_N^e]$: La matrice masse cohérente

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

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

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

$\{I_e\}$: La fonctionnelle élémentaire

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

M : Matrice de masse

$L_{\min}$: La plus petite dimension de l'élément du maillage

C_d : La vitesse d'une onde solide traversant l'élément

ξ : La valeur de l'amortissement critique

γ : Coefficient de frottement

μ et λ : Coefficients de lame

E : Le module de Young

ν : Coefficient de poisson

$R(U)$: Le résidu global

$\{ \}$: Vecteur

$[\]$: Matrice

$(:)$: produit contracté deux fois

Tableau II.1 : Variables d'états.....	42
Tableau IV.1 : caractéristiques élastiques de l'acier 304L.....	60
Tableau IV.2 : contraintes-déformation dans la zone d'écrouissage.....	61
Tableau IV.3 : paramètres du modèle de GURSON(GTN) pour de l'acier 304L	61
Tableau IV.4 : paramètres du modèle d'endommagement pour de l'acier 304L	62
Tableau IV.5 : le maillage utilisé.....	65
Tableau IV. 6: Représentations des zones endommagées de la section laminée de l'éprouvette pour les deux modèles.....	66

Liste des figures

Figure I.1 : Schématisation d'une opération de formage.....	01
Figure I.2 : Principaux procédés de mise en forme [Fel00].....	02
Figure I.3 : Schématisation d'un outil de découpage de tôles minces.....	03
Figure I.4 : Découpage d'une tôle.....	04
Figure I.5 : Courbe effort-pénétration lors d'une opération de découpage [Mai91].....	04
Figure I.6 : Procédé d'emboutissage.....	06
Figure I.7 : Pièces obtenues par emboutissage – a) petites pièces –b) pièces de gros volume.....	08
Figure I.8 : Procédé de pliage.....	08
Figure I.9 : a) Pliage en V b) Pliage en l'air.	09
Figure I.10 : a) Pliage en frappe b) Pliage en tombé de bord.....	09
Figure I.11 : Principe de matriçage.....	10
Figure I.12 : Opération d'extrusion.....	10
Figure I.13 a) Ecrasage simple b) Filage inverse central.....	11
Figure I.14 : a) Filage direct central b) Filage latéral.....	11
Figure I.15 : Pièces obtenues par extrusion.....	12
Figure I.16 : Principe du laminage	13
Figure I.17 : Schéma d'une cage quarto de laminage.....	14
Figure I.18 : Train de laminage.....	14
Figure I.19 : Recristallisation dynamique au cours du laminage à chaud.....	15
Figure I.20 : Cinétique de recristallisation statique.....	17
Figure I.21 : Principales interactions « multiphysiques » lors de la déformation à chaud.....	20
Figure I.22 : Principe des différences finies.....	23
Figure I.23 : représentation de l'écrouissage isotrope dans le plan des contraintes principales(1), et en traction/compression uni-axiale(2), ne modélisant pas l'effet Bauschinger (en pointillés bleus).....	28
Figure I.24 : Expérience de traction-compression schématisant l'effet Bauschinger.....	29
Figure I.25 : (1) représentation de l'écrouissage cinématique linéaire de Prager dans le plan des contraintes principales, et en traction/compression uni-axiales(2).....	31
Figure II.1 : Faciès de rupture ductile d'un aluminium [HABRAKEN01].....	33
Figure II.2 : Schématisation d'un métal contenant diverses inclusions.....	34

Liste des figures

Figure II.3 : Schématisation du mécanisme de germination des cavités.....	35
Figure II.4 : Croissance des cavités.....	36
Figure II.5 : Fin du stade de coalescence conduisant à la rupture totale de l'EVR.....	37
Figure II.6 : Réponse schématique d'une éprouvette en traction simple.....	37
Figure II.7 : Représentation d'un E.V.R endommagé.....	40
Figure II.8: Equivalence en énergie totale.....	44
Figure III.1 : conditions aux limites.....	50
Figure III.2 : Algorithme de résolution pour un problème mécanique par un schéma d'intégration dynamique explicite.....	57
Figure IV. 1 : courbe expérimentale Contrainte-Déformation pour l'acier 304L.....	59
Figure IV.2: schématisation de l'élément de volume représentatif (EVR).....	60
Figure IV.3: Superposition de la courbe expérimentale et numérique de La Contrainte-Déformation.....	62
Figure IV.4 : Superposition des courbes Contrainte-Déformation (SAANOUNI).....	63
Figure IV.5 : schématisation de l'essai de laminage.....	64
Figure IV.6 Maillage utilisé pour la plaque.....	65
Figure IV.7 : l'influence de pat de pénétration sur les forces de réaction de rouleau (SAANOUNI).....	67
Figure IV.8 : l'influence de pat de pénétration sur les forces de réaction de rouleau (GTN)....	67
Figure IV.9 : l'influence de vitesse de rotation sur les contraintes (SAANOUNI).....	68
Figure IV.10 : l'influence de vitesse de rotation sur les contraintes (GTN).....	69
Figure IV.11 : l'influence de pénétration de rouleau sur les contraintes(SAANOUNI).....	69
Figure IV.12 : l'influence de pénétration de rouleau sur les contraintes(GTN).....	70
FigureIV.13 : Influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction (SAANOUNI).....	70
Figure IV.14 : Influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction(GTN).....	71
Figure IV.15 : l'influence de vitesse de rotation sur les contraintes.....	71
Figure IV.16 : L'influence de pénétration de rouleau sur les contraintes.....	72
Figure IV.17 : L'influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction.....	72

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I :	Procédés de mise en forme
Introduction.....	01
I. Procédés de mise en forme.....	01
II. Le travail des métaux en feuilles	02
II.1 Le découpage	02
II.1.1 Opération de découpage d'une tôle	03
II.1.2 Comportement du matériau pendant l'opération de découpe	04
II.2. L'emboutissage.....	05
II.2.1 Emboutissage à chaud et l'emboutissage à froid.....	06
II.2.2 Les différentes phases de l'opération d'emboutissage.....	06
II.3. Le pliage.....	08
II.3.1 Description du procédé	08
III. Le travail des métaux à l'état massif	09
III.1. Le matriçage	09
III.2. L'extrusion.....	10
III.2.1. Les différentes techniques d'extrusion	11
III.2.2. Les pièces obtenues par extrusion	12
III.3. Le laminage	12
III.3.1 Laminage à froid et Laminage à chaud.....	13
III.3.1.a. Le réchauffage.....	15
III.3.1.b. Le laminage	16
III.3.2 Aspect métallurgique	16
III.3.3. Défauts de laminage	18
IV. Modélisation numérique de laminage : méthodes de calcul	20
IV.1 Méthode de l'énergie de déformation.....	20
IV.2. Méthode des tranches	21
IV.3. Méthode des différences finies	22

<i>IV.4. Méthode des éléments finis</i>	25
<i>IV.5 Lois d'écouleme.....</i>	27
<i>IV.5.1 Lois d'écrouissage isotrope</i>	28
<i>IV.5.1.1 L'effet Bauschinger.....</i>	29
<i>IV.5.2 Lois d'écrouissage cinématique.....</i>	30
<i>IV.5.2.1 Modèle d'écrouissage cinématique linéaire de Prager.....</i>	30
<i>Conclusion</i>	31

CHPITRE II : Comportement Elastoplastique Couplé à L'Endommagement

<i>Introduction</i>	32
<i>I. Description de l'Endommagement.....</i>	32
<i>I.1 L'endommagement instantané</i>	32
<i>I.2. Endommagements différés</i>	38
<i>I.3 Notion de forgeabilité.....</i>	39
<i>II. Représentations mathématiques du dommage ductile</i>	40
<i>II.1 Définition de la variable d'endommagement</i>	40
<i>II.2 Modélisation de l'endommagement</i>	41
<i>II.3 Représentation phénoménologique de l'endommagement par des variables</i> <i>d'état, Le modèle de SAANOUNI</i>	41
<i>II.3.1 Choix des variables d'états [Bel 02]</i>	41
<i>II.3.2 Notion de variables effectives.....</i>	42
<i>II.3.3 Potentiel et relation d'état</i>	45
<i>II.3.4 Potentiel des dissipations et relations complémentaires</i>	46
<i>II.4. Représentation physique de l'endommagement ductile par des cavités, le modèle</i> <i>de GURSON</i>	47
<i>Conclusion</i>	49

CHAPITRE III :	Implémentation numérique	50
Introduction.....		50
I.1 Implémentation numérique		
I .1.1 Discrétisation spatiale		50
<i>I.1 .2 Discrétisation spatiale du principe des puissances virtuelles (P.P.V)</i>		52
I.2 méthode de résolution.....		53
<i>I.2.1 Analyse statique implicite ((schéma de Newton-Raphson)).....</i>		53
<i>I.2.2 Analyse dynamique explicite</i>		54
Conclusion		58

CHAPITRE IV :	Simulation Numérique de Laminage	
Introduction.....		59
<i>I Test homogène.....</i>		59
<i>1 pour le modèle de SAANOUNI.....</i>		59
<i>2 pour le modèle de GURSON (GTN)</i>		60
II Propriété de matériau		60
III simulation numérique de laminage		63
IV description des conditions de la simulation.....		64
<i>IV.1 les conditions aux limites et maillage.....</i>		64
V résultats et analyse des essais de simulation.....		65
<i>V.1 étude de l'influence de pat de pénétration sur les forces de réaction de rouleau</i>		67
<i>V.2 Etude de l'influence de vitesse de rotation sur les contraintes</i>		68
<i>V.3 Etude de l'influence de l'avancement de rouleau</i>		69
<i>V.4 Etude de l'influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction.....</i>		70
VI Comparaison des résultats.....		71
Conclusion		72
		73
Conclusion générale.....		

Introduction générale

Dans tous les domaines de l'industrie, la notion de mise en forme des matériaux intervient soit en amont, en aval ou en cours de production. L'objectif premier est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérances données ainsi que des caractéristiques d'emploi, notamment mécaniques, précises. Parmi les techniques de formage les plus répandues dans l'industrie on trouve le laminage. Cette opération de mise en forme par déformation plastique, destinée à réduire la section d'un produit de grande longueur, s'effectue par passage de celui-ci entre deux ou plusieurs cylindres tournant autour de leur axe ; c'est la rotation des outils qui entraîne le produit dans l'emprise par l'intermédiaire du frottement.

Le laminage engendre un gradient de déformation suivant l'épaisseur de la tôle. Le cisaillement est plus ou moins intense en surface, mais nul à mi-épaisseur de la tôle.

Notre étude concerne le développement d'outils de simulation numérique des procédés de mise en forme. En effet, la prédiction numérique des procédés est devenue quasi-incontournable à l'échelle industrielle ; les très nombreux travaux consacrés à l'amélioration des modèles de comportement mécanique des matériaux ; des méthodes numériques et des outils de simulation conduisent aujourd'hui à une prédiction fiable mais perfectible des différents procédés de mise en forme, tels que le découpage, l'emboutissage, le laminage, le pliage...etc. parmi les nombreux logiciels de simulation qui permettent d'optimiser et de modéliser les différentes procédés de mises en forme on peut citer ABAQUS, FORGE 1 et 2, ...etc.

Dans ce travail, nous avons tenté de faire et de présenter la simulation numérique de procédé du Laminage, le manuscrit est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des différents procédés de mise en forme, notre attention est focalisée sur le laminage, pour lequel plusieurs détails seront présentés

Le deuxième chapitre met en évidence la formulation du couplage élastoplasticité-endommagement, où on présentera les modèles (SAANOUNI et GTN), qui permettent de décrire les principaux phénomènes physiques et phénoménologiques jouant un rôle dans la mise en forme.

Le chapitre trois, traitera les aspects numériques liés à l'implémentation du modèle élastoplastique couplé à l'endommagement, dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS.

L'objectif du quatrième chapitre, est de mettre en application notre étude par la simulation numérique du procédé de Laminage.

Enfin on présentera une conclusion générale qui résume les résultats de notre travail et les perspectives à aborder au future.

Introduction :

La conception, la fabrication et la mise au point de pièces ou structures utilisant des matériaux métalliques pour l'industrie vivent actuellement une importante évolution. En effet, le marché, les nouvelles réglementations, la sécurité, les économies d'énergie et la prise en compte du développement durable conduisent dorénavant à une diminution globale du poids des structures et à l'utilisation de nouveaux matériaux métalliques de plus en plus résistants.

Les techniques de mise en forme des matériaux ont pour objectif de donner une forme déterminée au matériau tout en lui imposant une certaine microstructure, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.). Les techniques diffèrent selon les matériaux.

I. Procédés de mise en forme par déformation plastique:

Un procédé de mise en forme consiste à conférer à une pièce, une géométrie donnée, décrite par une forme et des directions spécifiées par le bureau d'étude. On met en œuvre généralement un outillage (outil + matrice), permettant de transformer la matière en pièce finale (figure I.1).

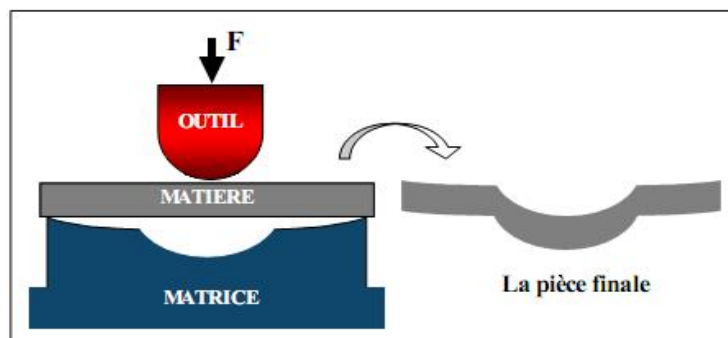


Figure I.1 : Schématisation d'une opération de formage.

La famille des procédés de fabrication, peut être schématisée par la figure I.2 suivante :

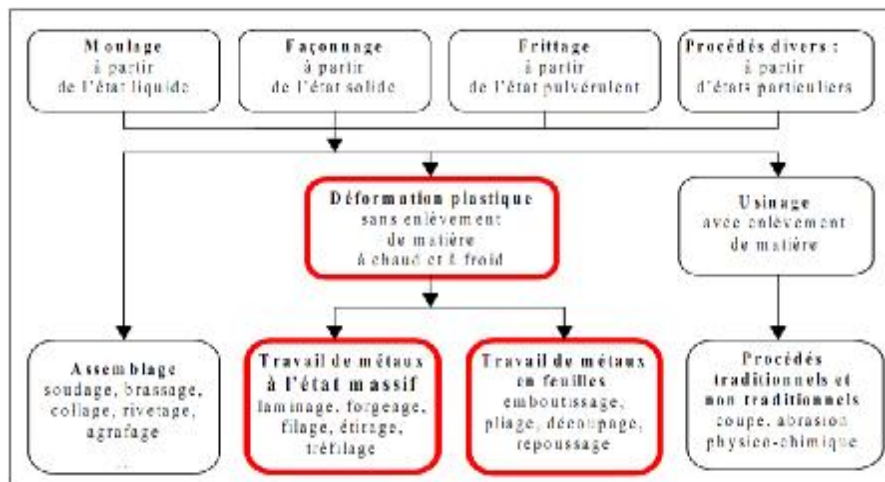


Figure I.2 : Principaux procédés de mise en forme [Fel00].

Les procédés de mise en forme par déformation plastique, sans enlèvement de matière, pourront être classés en deux grandes catégories :

1. Le travail des métaux en feuilles :

Pliage, emboutissage, fluotournage, repoussage, découpage, etc....

2. Le travail des métaux à l'état massif :

Laminage, forgeage, matriçage, estampage, filage ou extrusion, étirage, tréfilage, etc....

Dans cette étude, on développera quelques procédés de mise en forme tels que le découpage, l'emboutissage et le pliage, pour le travail des métaux en feuilles..

Pour le travail des métaux à l'état massif, on présentera : le matriçage, l'extrusion et le laminage.

II. Le travail des métaux en feuilles :

II.1 Le découpage :

L'opération de découpage consiste à enlever de la matière par cisaillement. La matière à découper disponible sous forme de tôle (appelée généralement flan, bande, etc.) est maintenue dans l'outil de découpage par la matrice et le serre flan. La séparation de la matière est assurée grâce aux parties coupantes de l'outil de découpage : la matrice et le poinçon.

Dans la configuration la plus utilisée pour ce type de procédés, l'outil de découpage présenté schématiquement par la figure I.3 est composé de trois blocs principaux:

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

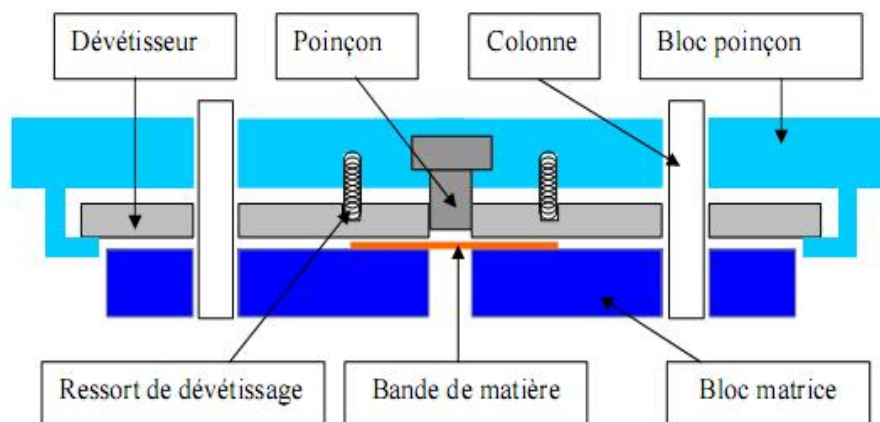


Figure I.3: Schématisation d'un outil de découpage de tôles minces.

II.1.1 Opération de découpage d'une tôle :

L'opération de découpage s'effectue sur une presse, consiste à appliquer sur une tôle un effort variable par l'intermédiaire d'un poinçon (partie mobile), et une matrice (partie fixe), qui joue le rôle d'une contre lame comme illustré sur figure I.4.

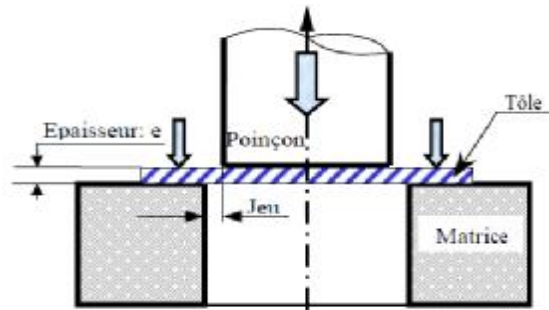


Figure I.4: Découpage d'une tôle.

Au moment du découpage, l'outillage (poinçon et matrice) subit des sollicitations cycliques et un échauffement engendré par le travail des actions de contacts entre la tôle, le poinçon, la matrice et par la puissance dissipée au sein de la matière. Il en résulte des problèmes de cassures, d'écaillage ou de grippage (rupture locale sur le bord de l'outil), ainsi que l'usure progressive des parties actives.

II.1.2 Comportement du matériau pendant l'opération de découpe :

Maillard [Mai 91], a décrit le comportement d'un acier de type XES, au cours de la découpe ainsi que les différentes étapes de l'opération de découpage, à travers une analyse de la courbe expérimentale présentant l'effort vertical exercé sur le poinçon, en fonction de sa pénétration à travers la tôle. Son allure générale est donnée par la figure(I.5).

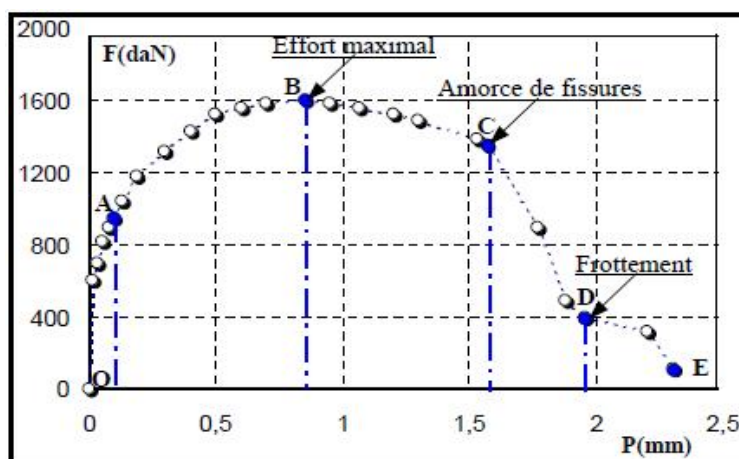


Figure I.5: Courbe effort-pénétration lors d'une opération de découpage[Mai91].

Cette courbe, illustre les différentes phases de l'opération qui rendent compte à la fois, du comportement du matériau et du degré de pénétration du poinçon dans la tôle. On distingue dans l'opération de découpage cinq phases principales, classées comme suit :

Phase OA : Comportement élastique du matériau.

Phase AB : Plastification avec écrouissage.

Phase BC : Plastification et réduction de la section en cisaillement.

Phase CD : Amorçage et propagation de fissures.

Phase DE : Frottement entre :

- poinçon et tôle
- matrice et pièce découpée
- pièce découpée et tôle.

L'analyse du processus de découpage est complexe, car divers phénomènes physiques tels que l'écrouissage, l'endommagement, l'initiation et la propagation des fissures doivent être pris en considération, afin de décrire l'opération entre son début (comportement élastique du matériau) et sa fin (rupture totale de la tôle).

II.2. L'emboutissage:

L'emboutissage, est un procédé de formage par déformation plastique, à chaud ou à froid des métaux. Il transforme une feuille de métal, appelée flan en une pièce.

L'opération de l'emboutissage de tôles, nécessite une presse à emboutir, de forte puissance, munie d'outillages spéciaux qui comportent, trois pièces (figure 1.6) :

- Un poinçon coulissant, suivant l'axe vertical déformant la tôle.
- Une matrice, qui sert d'appui à la tôle, et lui donne la forme extérieure finale.
- Un serre flan, qui a le rôle de maintenir le flan afin d'assurer un écoulement homogène du métal, et de prévenir les risques de plis ou autres défauts d'emboutissage.

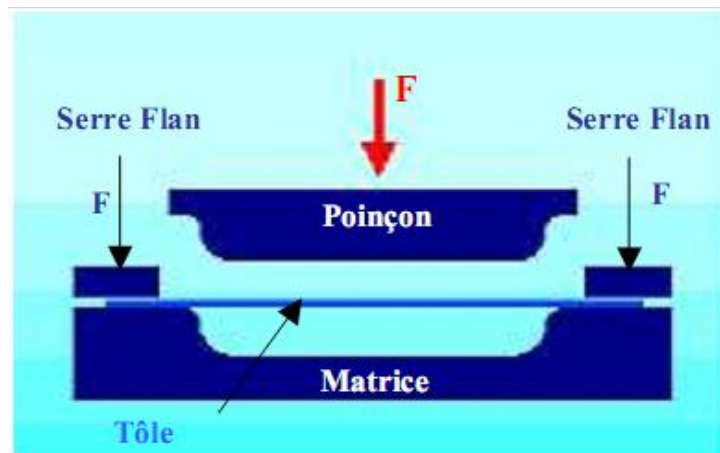


Figure I.6 : Procédé d'emboutissage.

II.2.1 Emboutissage à chaud et l'emboutissage à froid :

En fonction de la température de formage, il existe deux techniques d'emboutissage :

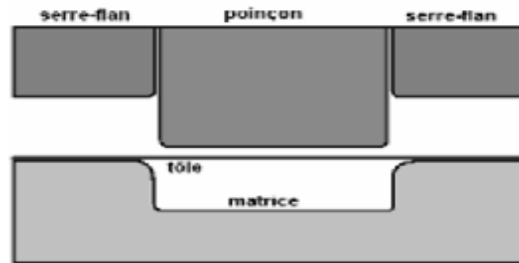
a- L'emboutissage à froid : cette technique, consiste à former une pièce à température ambiante. Elle est principalement utilisée, sur un outillage avec serre-flan mais peut aussi l'être sur un outillage sans serre flan, dans le cas où les emboutis sont peu profonds, ou s'ils nécessitent peu d'effort de serrage.

Ce type de formage, permet d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle, limite les coûts et évite la formation d'oxyde.

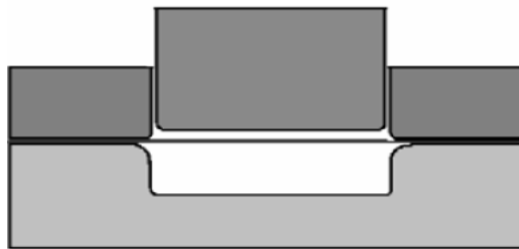
b- L'emboutissage à chaud : principalement utilisé sur presses hydrauliques. Le formage de fonds de réservoir en acier, est le plus important domaine d'application de ce procédé.

II.2.2 Les différentes phases de l'opération d'emboutissage :

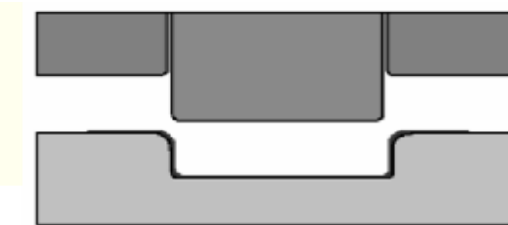
Phase 1 : poinçon et serre flan sont relevés. La tôle, préalablement graissée, est posée sur la matrice.



Phase 2 : le serre flan est descendu et vient appliquer une pression bien déterminée, afin de maintenir la tôle tout en lui permettant de fluer (couler).



Phase 3: le poinçon descend et déforme la tôle de façon plastique, en l'appliquant contre le fond de la matrice.



L'emboutissage sous presse présente de nombreux intérêts, tant par son aspect économique, que qualitatif. Cette technique de mise en forme, permet d'obtenir des pièces à des prix bas avec des cadences de production très élevées. Les applications de cette opération de mise en forme, sont extrêmement larges. On les trouve notamment dans les domaines suivants : transports (automobile pièces extérieures -carrosserie et intérieures - renforts), électroménager (radiateurs, machines à laver), ménager (casseroles), sanitaire (lavabos métalliques), emballage (boîte de boisson, conserves), etc.



Figure I.7 : Pièces obtenues par emboutissage – a) petites pièces – b) pièces de gros volume.

On peut rappeler également, que dans le domaine de l'automobile ; Les carrosseries obtenues par emboutissage, représentent à travers le monde environ 20 millions de tonnes d'acier par an [Che 04].

II.3. Le pliage :

Les études portant sur cette opération sont peu nombreuses dans la littérature, alors qu'elle est présente depuis longtemps, dans la pratique industrielle. Les nombres d'articles de fond sont réduits, les autres étant surtout d'ordres pratiques. Ils ne traitent pas cette opération de mise en forme, en tant que procédé industriel soulevant un problème scientifique, mais plutôt en tant que séquence élémentaire de fabrication.

II.3.1 Description du procédé :

Le pliage est la technique la plus utilisée dans la mise en forme. Une pièce pliée est formée par l'action verticale d'un poinçon rectiligne, sur une tôle supportée par une matrice (figure I.8).

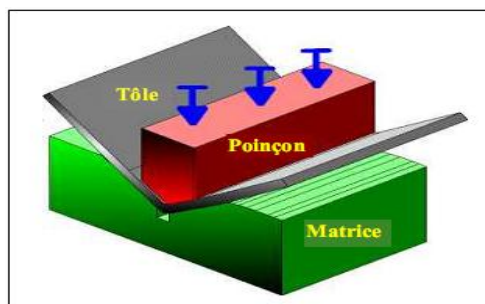


Figure I.8 : Procédé de pliage.

Cependant, il existe plusieurs types de pliage tels que : le pliage en V, le pliage en l'air, le pliage en tombé de bord ou en L, le pliage en U, etc. (figures I.9, I.10).

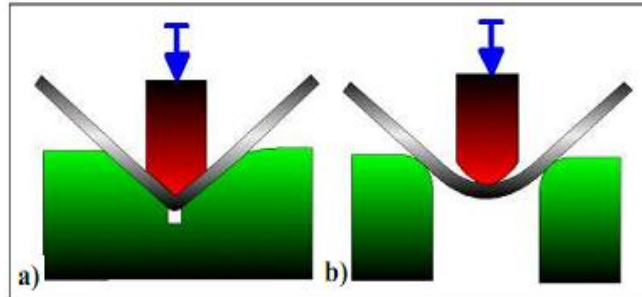


Figure I.9 : a) Pliage en V b) Pliage en l'air.

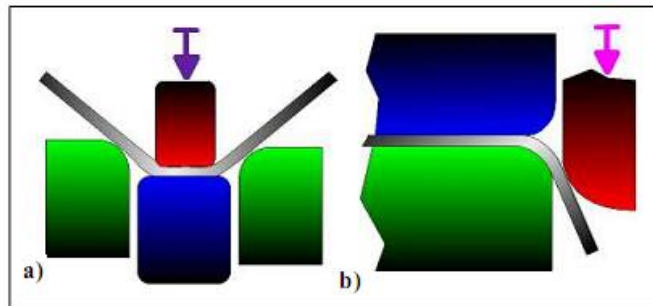


Figure I.10 : a) Pliage en frappe b) Pliage en tombé de bord

III. Le travail des métaux à l'état massif :

III.1. Le matriçage :

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

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

Le principe du matriçage est illustré dans la figure I.11 :

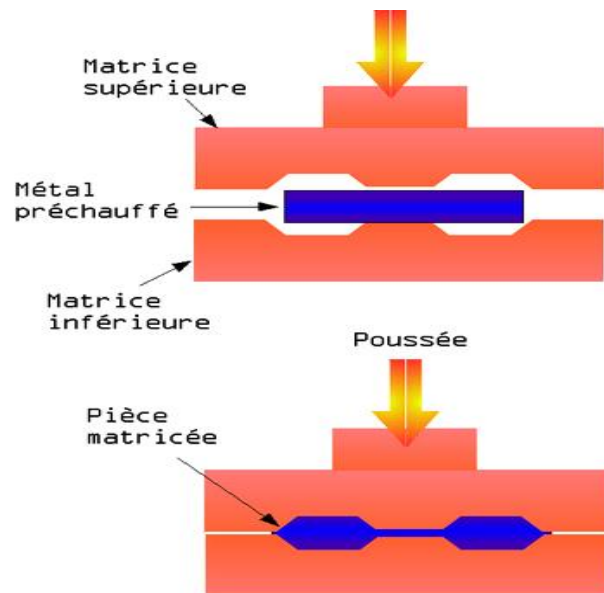


Figure I.11 : Principe de matriçage

III.2. L'extrusion :

L'extrusion, est un procédé de filage assez récent, qui consiste à porter les métaux à une température adéquate, puis à les faire passer, sous une très

forte pression à travers une filière (matrice) dont les ouvertures définissent le profil recherché (Figure I.12).

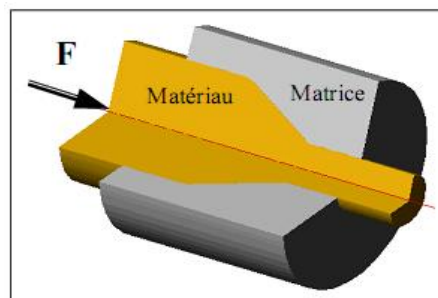


Figure I.12 : Opération d'extrusion.

III.2.1. Les différentes techniques d'extrusion :

Il existe plusieurs techniques d'extrusion. On présente ici les plus utilisées, en les classant en fonction du type d'extrusion, ainsi qu'en fonction du type de la pièce finale (pleine ou creuse) [Bos 85] :

Ø Ecrasage :

- pour les pièces pleines - simples ou semi-encastées (figure I.13 a)
- pour les pièces creuses - écrasement d'anneau ou écrasement semi-encasté.

Ø Filage inverse :

- pour les pièces pleines - filage inverse extérieur ou central (figure I.13 b)
- pour les pièces creuses - filage inverse extérieur ou central.

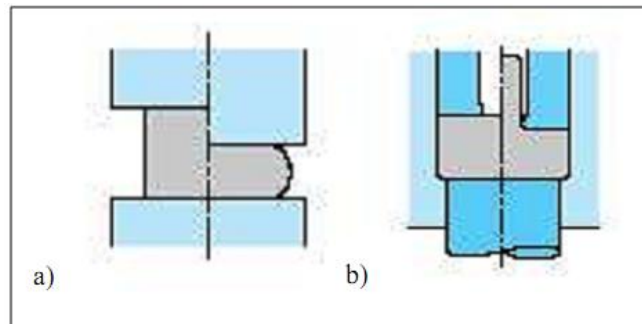


Figure I.13 : a) Ecrasage simple b) Filage inverse central.

Ø Filage direct :

- pour les pièces pleines - filage direct extérieur ou central (figure I.14 a).
- pour les pièces creuses - filage direct creux ou extérieur.

Ø Filage latéral :

- pour les pièces pleines (Figure I.14 b).

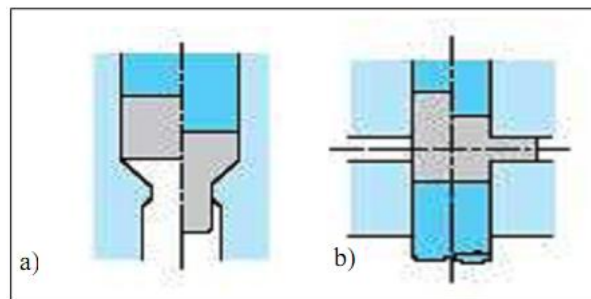


Figure I.14 : a) Filage direct central b) Filage latéral.

III.2.2. Les pièces obtenues par extrusion :

Les pièces obtenues par extrusion à l'aide des presses mécaniques de grandes dimensions, sont des pièces identiques à sections égales qui ont un très bon état de surface permettant souvent de les utiliser sans usinage complémentaire. Leurs domaines d'application sont très variés tels que : pétrochimie, sidérurgie et métallurgie, mécanique, énergie hydraulique, énergie nucléaire, marine, armement, aéronautique et autres [Ram20].

Le procédé d'extrusion est une opération de formage, qui présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- une cadence élevée de production,
- une économie de matière par rapport au forgeage à chaud ou l'usinage avec une perte de 5 et 20%,
- l'obtention de tolérances précises,
- pièces de géométrie complexe (Figure I.15).



Figure I.15 : Pièces obtenues par extrusion.

III.3. Le laminage :

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux, comme le métal ou tout autre matériau sous forme pâteuse, comme le papier ou les pâtes alimentaires. Cette déformation, est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres, tournant dans deux sens opposés appelés laminoirs, à l'aide des rouleaux d'amenée du lingot (Figure : I.16). Il existe aussi des opérations de laminage particulières utilisant plus de deux laminoirs.

Un laminoir est un outil industriel, ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau. Il permet également la production de barres profilées (produits longs). Il existe de nombreux types de laminoirs, on peut citer :

- laminoir à produits plats
- laminoirs industriels pour les métaux
- laminoir à papier
- laminoir à verre, afin de produire les verres imprimés, colorés ou non, utilisés dans l'aménagement intérieur, les vitrages et la décoration.
- laminoir à produits longs

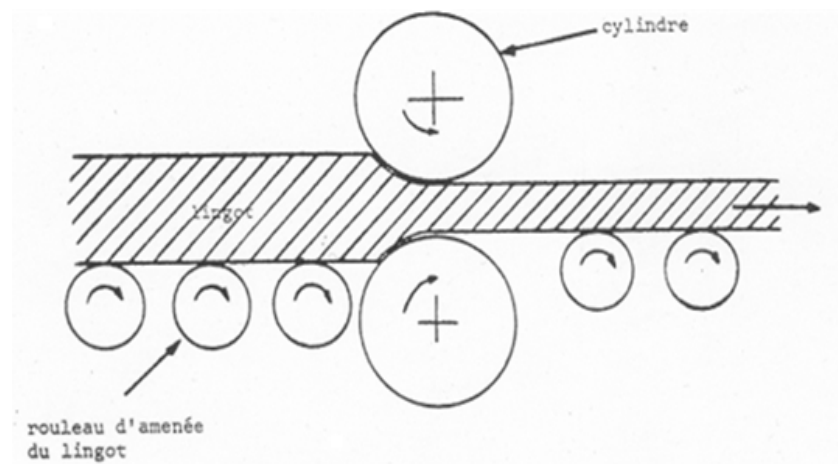


Figure I.16 : Principe du laminage

III.3.1 Laminage à froid et Laminage à chaud

Le laminage à chaud s'impose pour deux raisons capitales [Bataille, 2003] et [Montmitonnet, 2002]: la première est que la résistance à chaud du métal décroît très rapidement avec la température. La seconde est d'ordre métallurgique. Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

En pratique, les premières séries de réductions commencent à chaud afin d'atteindre facilement de fortes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du produit. Le passage à froid est ensuite nécessaire pour obtenir les caractéristiques

géométriques et mécaniques adéquates, ainsi qu'un bon état de surface.

Les cages des laminoirs sont généralement « quarto », composées de deux cylindres de travail de faible diamètre (de l'ordre de 10 cm), assurant le laminage, et de deux cylindres d'appui de diamètre plus grand, comme schématisé sur la Figure I.17. Différents actionneurs de la cage (vis de serrage, vérins, etc.) permettent de régler l'épaisseur correcte en sortie d'emprise.

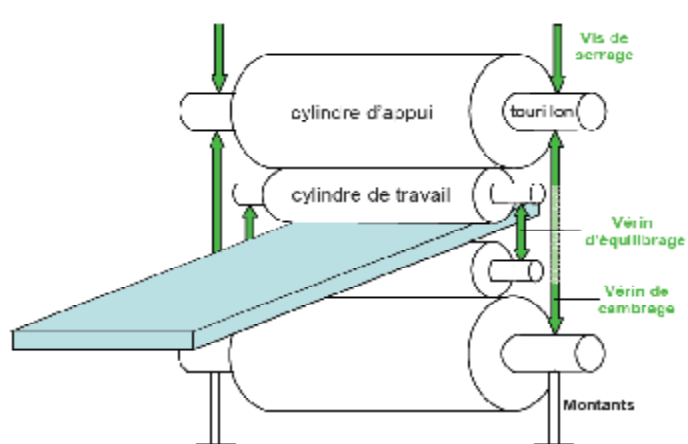


Figure I.17 : Schéma d'une cage quarto de laminage

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage (figure I.18). Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande.

Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage.

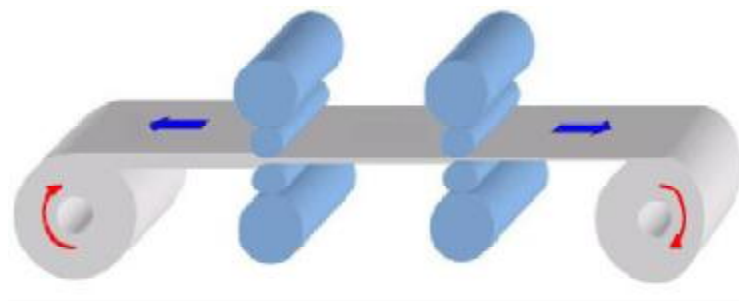


Figure I.18 : Train de laminage

A froid, un traitement thermique peut être fait pour restaurer la structure et éviter la rupture par endommagement. Au contraire pendant le laminage à chaud, la recristallisation dynamique s'effectue au cours de la déformation tant que la température du produit le permet (figure I.19).

Le laminage à froid n'est nécessaire généralement que pour obtenir des tolérances serrées, et un bon état de surface. D'un point de vue pratique, la différence entre le procédé à chaud et le procédé à froid tient donc surtout à la différence des géométries des produits qu'ils traitent. En l'occurrence, plus épais pour les laminages à chaud et plus minces pour les laminages à froid.

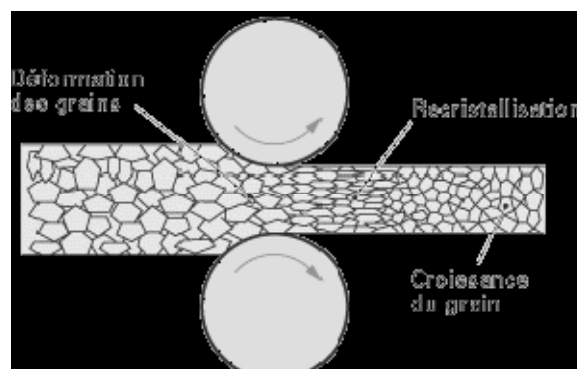


Figure I.19 : Recristallisation dynamique au cours du laminage à chaud

Les différentes étapes du laminage à chaud sont :

III.3.1.a. Le réchauffage :

Le réchauffage des aciers au carbone et des aciers microalliés comporte trois objectifs principaux :

Le premier, d'ordre mécanique, est simplement de porter le métal à une température suffisante pour diminuer les efforts de formage, accroître la ductilité de l'acier de façon à pouvoir lui appliquer des déformations importantes, et de finir le laminage dans le domaine austénitique.

Le second objectif, qui est plutôt une conséquence favorable du premier, est de se placer dans le domaine austénitique avec, pour conséquences, d'effacer partiellement la structure très

grossière issue de la solidification et de réduire les gradients de composition dus au phénomène de ségrégation.

Enfin, l'objectif essentiel de cette phase de réchauffage est la remise en solution des précipités apparus au cours de la solidification, en premier lieu parce qu'ils sont trop gros, et donc pas assez nombreux pour contribuer au durcissement de l'acier à température ambiante, et parce que les éléments tels que le niobium, le titane ou le vanadium jouent un rôle très important sur l'évolution de la structure au cours du laminage et de la transformation « allotropique » lorsqu'ils sont en solution solide [Fabrègue, 2000].

III.3.1.b. Le laminage :

D'un point de vue métallurgique, le laminage apparaît comme une succession de déformations (des passes) qui vont engendrer un écrouissage (et restauration éventuellement) du métal, et de temps d'attente (les inters passes) pendant lesquels la structure de l'acier pourra évoluer.

III.3.2 Aspect métallurgique :

III.3.2.a. Ecrouissage et restauration du métal pendant la déformation :

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable. La présence des dislocations et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie stockée sous forme de dislocations.

Dans le présent travail nous traitons la déformation plastique, dans ce cadre le nombre de dislocations va rapidement croître ce qui va conduire au durcissement de l'acier, et est couramment appelé : Phénomène d'écrouissage.

A la création de ces dislocations vont être opposés différents mécanismes conduisant à leur élimination et donc à l'adoucissement du matériau ; ce sont les phénomènes de restauration et recristallisation.

Il est également nécessaire de distinguer l'adoucissement qui se produit simultanément à la déformation, c'est la restauration ou recristallisation dynamique, de celui qui intervient après la déformation, c'est la restauration et recristallisation statique ou post-dynamique.

III.3.2.b. Recristallisation statique :

Comme il a déjà été évoqué ci dessus, la recristallisation procède par germination et croissance de nouveaux grains. La recristallisation complète est atteinte lorsque les grains écrouis ont été intégralement éliminés et remplacés par des grains exempts d'écrouissage. La recristallisation statique se produisant après l'arrêt de la déformation, sa cinétique est de ce fait exprimée en fonction du temps ; elle présente une allure spécifique (figure I.20) qui est bien traduite par une loi de type Avrami [Fabrègue, 2000] :

$$FR(t) = 1 - \exp(-kt^n) \quad I.1$$

FR : fraction de recristallisation statique ; t : temps ; k et n : deux constantes caractérisant la cinétique. ($n=2$ à 5)

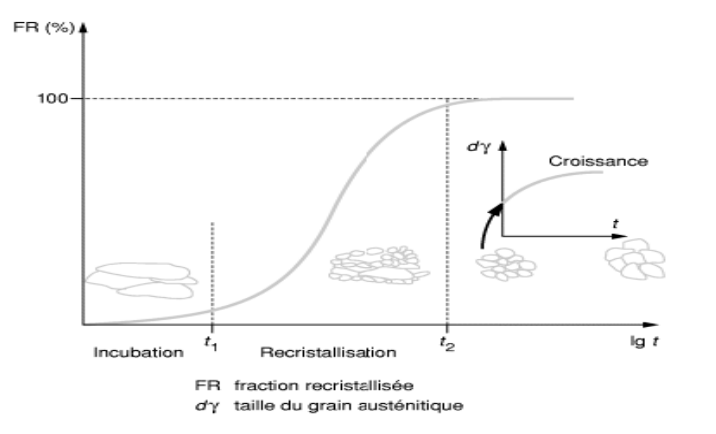


Figure I.20 : Cinétique de recristallisation statique

III.3.2.c. Recristallisation dynamique :

Comme pour la recristallisation statique, la recristallisation dynamique en phase austénitique procède par germination et croissance de nouveaux grains. La première spécificité de la recristallisation dynamique réside dans le fait que l'environnement du nouveau grain recristallisé continue de s'écrouir avec le ralentissement de sa croissance. La recristallisation dynamique conduit donc à un affinement très important de la structure, au moins jusqu'à l'arrêt de la déformation. La seconde spécificité du phénomène est que la structure peut recristalliser plusieurs fois de suite au cours de la déformation. Contrairement au cas de la recristallisation statique, l'avancée de la recristallisation dynamique ne dépend pas du temps mais de la déformation appliquée. Les cinétiques sont également exprimées sous la forme d'une loi d'Avrami où le paramètre temps est remplacé par le paramètre déformation [Fabrègue, 2000].

$$FR(t) = 1 - \exp(-k \epsilon^n) \quad 1.2$$

III.3.3. Défauts de laminage :

III.3.3.a. Défauts géométriques :

Les machines et les outils (cylindres, cages...) ne sont pas infiniment rigides, se déforment, et cèdent élastiquement sous les efforts appliqués. Cela perturbe aussi la géométrie des produits, créant des problèmes de profil et de planéité des produits plats. Des problèmes de réglage des outils de production peuvent avoir des conséquences du même ordre.

Des défauts géométriques peuvent apparaître à la suite de la déformation locale du rouleau en contact avec la tôle dans l'emprise [Fabrègue, 2000] . Les contraintes de pression dans

Le contact sont relaxée par l'élargissement de la tôle qui est fort si les rapports épaisseur/largeur et épaisseur/longueur de contact sont grands (c'est le cas du laminage à chaud). Cet élargissement est faible car inhibé par le frottement des outils dans le cas du laminage à froid; les contraintes de contact, donc les déformations des cylindres, seront très fortes si on lamine des produits minces parce que les effets du frottement seront exacerbés par le grand rapport surface/volume. Le rôle des efforts de tension et contre tension imposées par les moteurs de bobinage est dans ce cas primordial pour minimiser ces défauts.

A ces défauts d'origine mécaniques se superposent des déformations d'origine thermiques, liées à la dilatation, qui conduit à une hétérogénéité du diamètre du cylindre le long de son axe. Ces dilatations peuvent entraîner des hétérogénéités d'épaisseur des produits finaux.

III.3.3.b. Défauts métallurgiques et microstructuraux :

Les défauts microstructuraux sont très dépendants de l'alliage considéré. Ce sont des tailles de grains hétérogènes, des textures cristallographiques mal orientées, des inclusions non métalliques, des porosités, des fissures. Certains de ces défauts sont hérités des structures de coulée [Farhi, 1989].

Les discontinuités (porosités, fissures et criques), qui relèvent des phénomènes et mécanismes d'endommagement des matériaux, sont engendrées par la conjugaison d'états de contrainte de tension et de l'existence d'hétérogénéités : d'où un couplage mécanique/métallurgie à l'échelle microscopique [Montheillet et al. 1998].

De plus les paramètres de structure granulaire et de texture évoluent autant par la déformation elle-même que lors des recristallisations induites par la déformation à chaud (recristallisation dynamique) ou lors des traitements thermiques (recristallisation statique).

Leur prévision passe par l'utilisation des modèles de métallurgie physique appropriés, eux mêmes couplés à la thermomécanique [Bunge et al. 1997].

III.3.3.c. Défauts de surface :

Parmi les défauts de surface se distinguent les défauts de type chimique comme la corrosion, incrustation d'oxyde, pollutions par les lubrifiants ou des défauts de rugosités. Ce dernier cas est très directement contrôlé par la mécanique du contact produit-cylindre [Montmitonnet ,2002]. Des microfissures peuvent provenir de contraintes de traction superficielle, des porosités peuvent être la conséquence du piégeage de lubrifiants (poches d'huile) ou de phénomènes de corrosion, du rebouchage incomplet de trous initiaux induits par un décapage par exemple.

Pour minimiser ces déformations ou corriger ces défauts, on peut recourir à des actionneurs de profil, en pratique des vérins d'équilibrage du cylindre de travail ou de cambrage des cylindres d'appui. Le pilotage de ces actionneurs n'est toutefois pas aisé.

D'autres techniques de correction peuvent être utilisées : la translation des cylindres de travail (roll shifting) [Berger, 87], le refroidissement ou la lubrification différentielle, ou encore *

le désaxement des cylindres haut / bas (pair-cross)...Tous ces problèmes de géométrie ne seront pas pris en compte dans notre modélisation.

Et pour conclure, on peut résumer les principales interactions, métallurgiques, thermiques et mécaniques par le schéma ci dessous (figure I.21) :

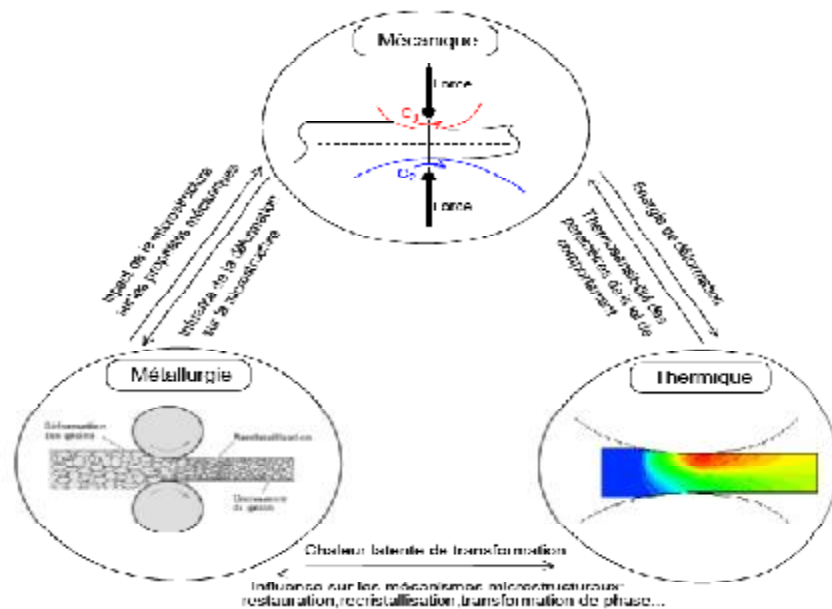


Figure I.21 : Principales interactions « multiphysiques » lors de la déformation à chaud

IV. Modélisation numérique de laminage : méthodes de calcul :

Le choix de la méthode de modélisation du procédé de laminage, dépend de la nature du problème à traiter (laminage à chaud, à froid avec ou sans bobinage...), des questions posées et des résultats recherchés. Dans cette partie on va présenter les principales méthodes de calcul, les avantages, les inconvénients et les éléments de choix. Nous justifierons ensuite les méthodes que nous allons choisir pour la partie modélisation.

IV.1 Méthode de l'énergie de déformation :

La méthode se résume en deux simplifications (hypothèses) et une formule : pour tout le volume déformé plastiquement V on choisit :

- Ø Une vitesse de déformation uniforme $\dot{\epsilon}$
- Ø Une valeur uniforme de la contrainte d'écoulement σ_0

Ø La puissance de déformation plastique s'écrit : $\dot{W}_i = \sigma_0 \dot{\epsilon} V$ 1.3

L'avantage de cette méthode est qu'elle fournit très rapidement un ordre de grandeur des efforts moteurs et de l'énergie mise en jeu dans le procédé.

Cependant la première hypothèse n'est généralement pas vérifiée et surtout dans notre cas où les gradients de vitesse de déformation jouent un rôle très important.

Cette méthode ne fait pas intervenir :

- Ø La forme des outils.
- Ø La nature des contacts métal-outil.

Enfin elle néglige deux formes de travaux dissipés :

- Ø Le travail de frottement.
- Ø Le travail de déformation redondant (hétérogénéité de la déformation).

Les valeurs obtenues pour la force et le travail sont donc des valeurs approchées par défaut qui ne peuvent être qu'un premier ordre de grandeur.

IV.2. Méthode des tranches :

L'objectif de la méthode des tranches est de calculer, *en tenant compte des frottements*, une valeur approchée des efforts moteurs et de la distribution de pression au contact des outils.

Cette méthode consiste à :

- Ø découper par la pensée le matériau en tranches verticales infiniment minces.
- Ø Faire le bilan de l'ensemble des forces appliquées à une tranche et en déduire l'équation d'équilibre.
- Ø Une hypothèse sur le modèle de frottement donne la valeur de la cisssion en fonction de la contrainte normale.
- Ø Le critère de plasticité est écrit dans le cadre de l'hypothèse de l'invariance des contraintes principales dans une tranche. Il permet de trouver une relation entre les contraintes principales.
- Ø L'application de la loi d'écoulement au mode simplifié de déformation donne une relation entre les contraintes.

- Ø L'équation d'équilibre se ramène alors à une équation différentielle pour les contraintes principales ; une condition à la limite permet d'obtenir par intégration la distribution des contraintes.
- Ø Les efforts moteurs se calculent alors par intégration des contraintes sur les surfaces de contact.

L'intérêt de la méthode des tranches est de prendre en compte le frottement du matériau sur les outillages, or les simplifications nécessaires aboutissent à une contradiction de base :

On tient compte des frottements sur une tranche au niveau global des efforts exercés sur la tranche mais non au niveau local de la distribution des contraintes dans la tranche (absence de cisaillement). Donc les résultats de la méthode des tranches seront d'autant meilleurs que le travail de frottement sera grand par rapport au travail de déformation, donc que la surface frottante sera grande par rapport à la surface libre. Ces modèles sont donc plus pertinents pour le laminage des tôles minces avec des grands diamètres de cylindres.

De plus, cette méthode ne permet pas de prévoir les gradients des grandeurs mécaniques suivant l'épaisseur de la tôle.

IV.3. Méthode des différences finies :

Si on s'intéresse uniquement à la modélisation thermique on peut utiliser la méthode des différences finies en tenant compte le cas échéant du champ de vitesse subi par le matériau, dans le terme de dérivée particulaire de la température.

L'équation de la chaleur dans le cas générale s'écrit :

$$\rho c \vec{v} \overline{\text{grad}(T)} - \lambda \Delta(T) + \Gamma_a \sigma_0 \dot{\varepsilon} \quad \text{I.4}$$

Qu'on peut l'écrire sous cette forme :

$$\rho c \cdot \begin{pmatrix} v_{x,j}^x \\ v_{x,j}^y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}_{/i,j} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]_{/i,j} + \Gamma_a \sigma_0 \dot{\varepsilon} \quad \text{I.5}$$

Le principe de cette méthode pour la résolution de cette EDP est présenté ci-dessous.

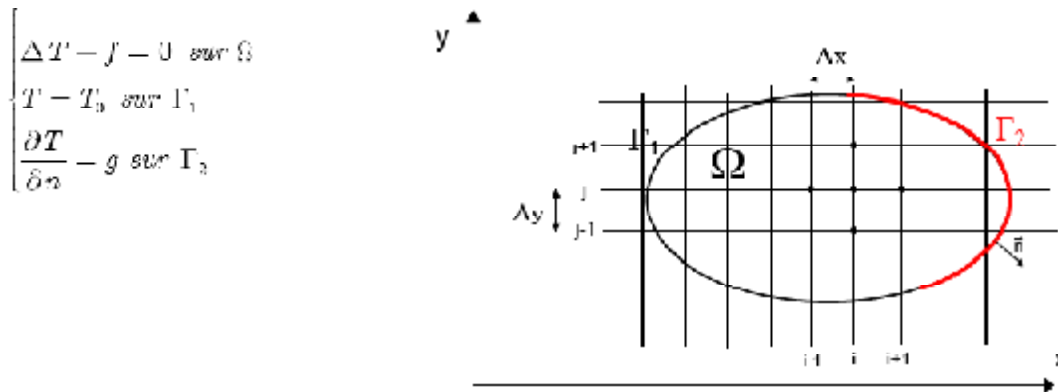


Figure I.22 : Principe des différences finies

IV.3.a. Mailler le domaine :

Un maillage est un ensemble de points du domaine de définition sur lequel on va appliquer la méthode des différences finies (Figure I.22). Pour une application définie sur un segment (dimension 1), on ajoutera en général les deux extrémités du segment ; pour un maillage en dimension supérieure, on sera amené à choisir, éventuellement, des points du contour du domaine de définition.

IV.3.b. Discrétisation:

Pour calculer $T_j^{(n)}$, on utilise les points situés de part et d'autre de x_j . Considérons les développements en séries de Taylor autour de x , de la fonction T :

$$\begin{cases} T(x - h_1) = T(x) + h_1 T'(x) - \dots + \frac{h_1^n}{n!} T^{(n)}(x) & \text{I.6} \\ T(x + h_2) = T(x) + h_2 T'(x) + \dots + (-1)^n \frac{h_2^n}{n!} T^{(n)}(x) & \text{I.7} \end{cases}$$

Soit $T_{ij} = T(x_i, y_j)$

Pour $x = x_i$ et $y = y_j$, on obtient à partir du développement précédent à l'ordre 2 :

$$\left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2 \Delta x} \right. \quad \text{I.8}$$

$$\left[\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{i,j} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2 \Delta y} \right. \quad \text{I.9}$$

En additionnant les développements en séries de Taylor des fonctions $T(x+h_1)$ et $T(x-h_2)$ à l'ordre 2, on obtient :

$$\left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right. \quad \text{I.10}$$

$$\left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j} = \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right. \quad \text{I.11}$$

Et finalement :

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial y \partial x} \right)_{i,j} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2 \Delta x} \right) = \frac{T_{i+1,j+1} - T_{i-1,j+1} - T_{i+1,j-1} + T_{i-1,j-1}}{4 \Delta x \Delta y} \quad \text{I.12}$$

IV.3.c. Conditions aux limites :

En général, on impose sur le contour (en tout point), des conditions aux limites de type Dirichlet ou Neumann.

En mathématiques, une condition aux limites de Dirichlet est imposée à une équation différentielle (ED) ou à une équation aux dérivées partielles (EDP) lorsque l'on spécifie les valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières/limites du domaine. C'est la valeur de T dans notre cas. Cependant, une condition aux limites de Neumann (nommée d'après Carl Neumann) est imposée à ED ou EDP lorsque l'on spécifie les valeurs des dérivées que la solution doit vérifier sur les frontières/limites du domaine. Soit le gradient de T dans notre exemple.

IV.3.d Résoudre le système :

Pour résoudre ces équations, on est en général amené à résoudre des systèmes d'équations de tailles conséquentes. La méthode utilisée pour la résolution de ce système va jouer un rôle très important sur le temps de calcul.

Il y a plusieurs méthodes de résolution des systèmes. Pour les systèmes linéaires, on utilise les méthodes directes ; qui sont des méthodes dans lesquelles la solution est obtenue de façon exacte (, aux erreurs « d'arrondis machine » près) en un nombre fini d'opérations. Le prototype de méthode directe est la méthode du pivot de Gauss. Et des méthodes itératives ; le vecteur solution du système est obtenu comme limite, quand elle existe, d'une suite itérative de vecteurs définie par une récurrence linéaire. Parmi les itératives on cite la méthode de Jacobi et la méthode de Gauss-Seidel ou de relaxation. Parmi les méthodes de résolution des systèmes non linéaire, on mentionne la méthode de Newton-Raphson.

Pour conclure :

Les avantages de la méthode des différences finies :

- grande simplicité d'écriture ;
- faible coût de calcul.

Les inconvénients de la méthode des différences finies :

- limitation de la géométrie des domaines de calculs ;
- difficultés de prise en compte des conditions aux limites ;
- en général, absence de résultats de majoration d'erreurs.

IV.4. Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à rechercher une solution approchée de la solution exacte sous la forme d'un champ $\tilde{F}(M,t)$ défini par morceaux sur des sous domaines de Ω . Les n sous domaines Ω_i doivent être tels que :

$$\bigcup_{i=1}^n \Omega_i = \Omega \quad \text{et} \quad \tilde{\Omega}_i \cap \tilde{\Omega}_j = \emptyset \quad \forall i \neq j \quad \text{I.13}$$

Où $\tilde{\Omega}_i$ désigne l'intérieur de Ω_i . Autrement dit, les Ω_i sont une partition de Ω . Les champs

$\tilde{f}_i(M,T)$, définis sur chaque sous domaines sont des champs choisis parmi une famille arbitraire de champs (généralement polynômiaux). La famille de champs locaux est appelée espace des

fonctions d'interpolation de l'élément. La famille de champs globaux $\tilde{F}(M,t)$, obtenus par juxtaposition des champs locaux est appelée espace des fonctions d'interpolation du domaine Ω .

Le champ dans chaque sous domaine Ω_i est déterminé par un nombre fini de valeurs du champ (ou de valeurs de ses dérivées) en des points choisis arbitrairement dans le sous domaine, et appelés noeuds. Le champ local est une interpolation entre les valeurs aux noeuds.

Le sous domaine muni de son interpolation est appelé élément.

Chercher une solution par éléments finis consiste donc à déterminer quel champ local on attribue à chaque sous domaine pour que le champ global $\tilde{F}(M,t)$ obtenu par juxtaposition de ces champs locaux soit proche de la solution du problème.

Parmi les contraintes qu'on impose à la solution approchée cherchée, il y a souvent au moins une continuité simple à la frontière entre les sous domaines.

La qualité de la solution approchée dépend de la division en sous domaines (nombre et dimensions des sous domaines), du choix de la famille de champs locaux dans chaque sous domaine, et des conditions de continuité qu'on impose aux frontières des sous domaines. Une fois ces choix faits, il reste à rechercher, une combinaison de champs locaux qui satisfait approximativement les équations.

Pour résoudre un problème par la méthode des éléments finis, on procède donc par étapes successives :

1. On se pose un problème physique sous la forme d'une équation différentielle ou aux dérivés partielles à satisfaire en tout point d'un domaine Ω , avec des conditions aux limites sur le bord $\partial\Omega$ nécessaires et suffisantes pour que la solution soit unique.
2. On construit une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : C'est la formulation variationnelle du problème.
3. On divise Ω en sous domaines : C'est le maillage. Les sous domaines sont appelés mailles.
4. On choisit la famille de champ locaux, c'est à dire à la fois la position des nœuds dans les sous domaines et les polynômes (ou autres fonctions) qui définissent le champ local en fonction des valeurs aux noeuds (et éventuellement des dérivées). La maille complétée par ces informations est alors appelée élément.
5. On ramène le problème à un problème discret : C'est la discrétisation. En effet, toute solution approchée est complètement déterminée par les valeurs aux nœuds des éléments.

Comment choisir le problème discret dont la solution est "proche" de la solution exacte? Quelle signification donner au mot "proche"?

Les étapes 1, 2, 3, 4 et 5 sont souvent rassemblées sous le nom de prétraitement.

6. On résout le problème discret: C'est la résolution

7. On peut alors construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées aux nœuds et en déduire d'autres grandeurs: C'est le post-traitement.

8. On visualise et on exploite la solution pour juger de sa qualité numérique et juger si elle satisfait les critères du cahier des charges : C'est l'exploitation des résultats.

Pour résumer :

Les avantages de la méthode des éléments finis :

- traitement possible de géométries complexes ;
- détermination plus naturelle des conditions aux limites ;
- possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

Les inconvénients de la méthode des éléments finis :

- complexité de mise en oeuvre ;
- coût en temps de calcul et en mémoire.

IV.5 Lois d'écoulement :

L'état de contrainte et de déformation, en un point donné à l'intérieur du domaine élastique, ne dépend que de l'état initial et de l'état final. Il existe une relation biunivoque entre la contrainte et la déformation (loi de Hook). Lorsqu'on atteint la limite de l'élasticité et lorsqu'on la dépasse, deux cas peuvent se produire, selon la nature du matériau; soit il est parfaitement plastique ou plastique *écrouissable*.

Dans le premier cas, la contrainte n'évolue pas avec la déformation, et la surface d'écoulement reste inchangée. Ainsi, la limite d'écoulement nécessaire pour poursuivre la déformation plastique est indépendante de la déformation plastique, déjà réalisée.

Dans le deuxième cas, la contrainte augmente avec la déformation, le matériau se consolide et la surface d'écoulement évolue. Dans ce cas, la limite d'écoulement dépend

du chemin plastique parcouru. L'évolution ou la consolidation (**écrouissage**) de la surface de charge, peut être schématisée par deux lois :

IV.5.1 Lois d'écrouissage isotrope :

Le critère d'écrouissage isotrope, est classiquement utilisé en formage de tôle. La surface de charge ne dépend pas dans ce cas, du tenseur d'écrouissage cinématique X , qui reste nul pendant l'opération de mise en forme. L'évolution de la surface de charge au cours du temps, se traduit géométriquement par une dilatation isotrope de la surface d'écoulement initiale, dans l'espace des contraintes. Cette dilatation est directement gérée par la limite d'écoulement σ_0 .

La taille de la surface, est directement pilotée par la contrainte d'écoulement plastique, qui correspond initialement à la limite d'élasticité. La figure (I.23), montre une représentation tridimensionnelle de l'évolution de la surface de charge, dans le repère des contraintes principales, dans le cas de l'écoulement isotrope. L'évolution des contraintes et des déformations correspondantes, est aussi décrite pour le cas simple d'une traction, suivie d'une compression uni-axial.

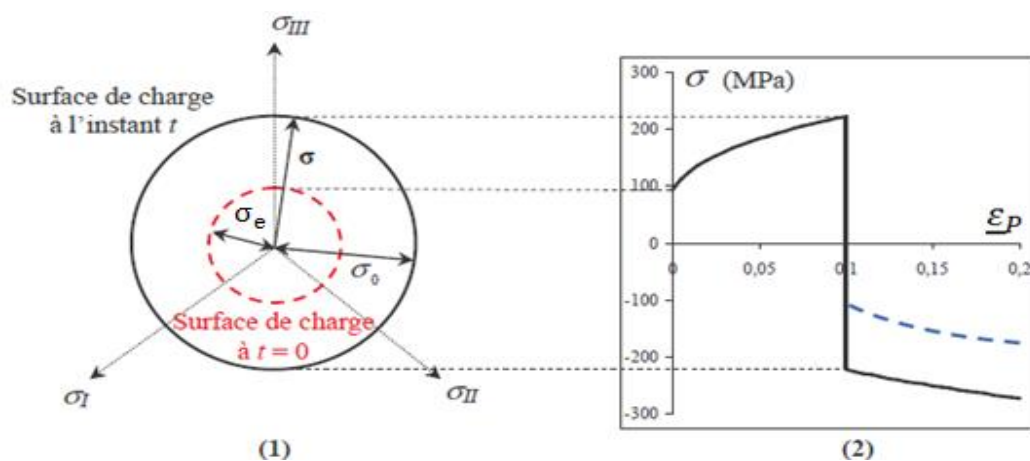


Figure I .23: représentation de l'écrouissage isotrope dans le plan des contraintes principales(1), et en traction/compression uni-axiale(2), ne modélisant pas l'effet Bauschinger (en pointillés bleus).

Si l'écouissage isotrope décrit bien le durcissement du matériau, en cours de déformation monotone, il ne tient pas compte de l'effet Bauschinger des tôles, qui se manifeste par un abaissement de la contrainte d'écoulement plastique lorsqu'un matériau initialement en traction (respectivement compression), est soumis à la compression (respectivement traction).

IV.5.1.1 L'effet Bauschinger :

Dans le cas d'un essai de traction simple sur une éprouvette d'un matériau écouissable (figure I.24) ; après décharge suivant BC, on sollicite l'éprouvette en compression. On constate que le seuil de plasticité en compression initialement égal à $\sigma_B = -\sigma_e$, se trouve ramené à la valeur σ'_B .

Autrement dit, l'écouissage qui correspond à un relèvement du seuil de plasticité en traction, s'accompagne d'une diminution (en valeur absolue) du seuil de plasticité en compression. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Bauschinger (Constaté pour la première fois par Bauschinger en 1886, sur un essai de traction-compression du fer).

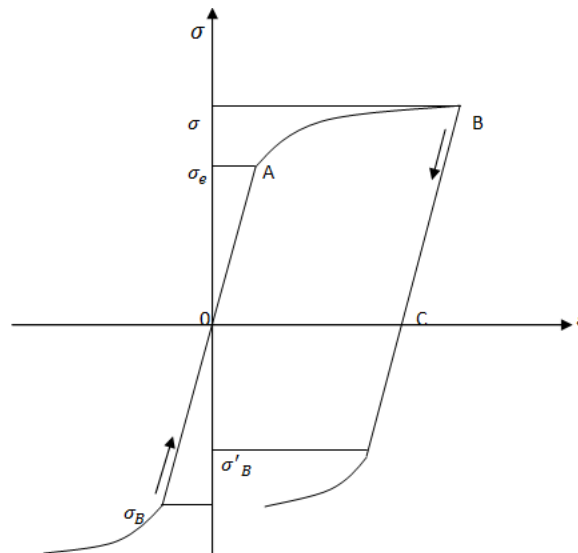


Figure I .24: Expérience de traction-compression schématisant l'effet Bauschinger.

IV.5.2 Lois d'écrouissage cinématique :

L'équation générale de la surface de charge, relative au critère d'écoulement cinématique, fait intervenir le tenseur d'écrouissage cinématique X et se réduit en élastoplasticité à :

$$\underline{f} = \underline{\sigma}(S - X) - \sigma_e \quad \text{I.14}$$

La contrainte limite d'écoulement, reste constante et égale à la limite d'élasticité σ_e . Autrement dit, cette condition, empêche la dilatation de la surface de charge assimilée à un corps rigide, dont le centre se déplace dans l'espace des contraintes. Il est donc nécessaire de connaître la loi d'évolution du tenseur d'écrouissage cinématique, pilotant le déplacement du centre de la surface de charge au cours du temps.

IV.5.2.1 Modèle d'écrouissage cinématique linéaire de Prager :

Prager, a proposé la loi d'évolution linéaire, introduisant un coefficient de proportionnalité C_0 , entre la variation temporelle du tenseur d'écrouissage cinématique X , et le tenseur des vitesses de déformation plastique $\dot{\epsilon}_P$:

$$\dot{X} = \frac{2}{3} C_0 \dot{\epsilon}_P \quad \text{I.15}$$

L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation, est nécessairement linéaire. La figure (I.25) représente la transformation géométrique de la surface de charge, dans le repère des contraintes principales, pour le cas particulier du critère de plasticité de von Mises. Si l'effet Bauschinger est qualitativement représenté par ce modèle, sa quantification n'est pas correcte, puisque le retour à la compression pour des déformations supérieures à $(\underline{\epsilon}_1)$, impose une contrainte nécessairement négative, or le graphe(2) de la figure, montre le contraire. Cependant, ce modèle est de base pour la formulation de l'écrouissage cinématique.

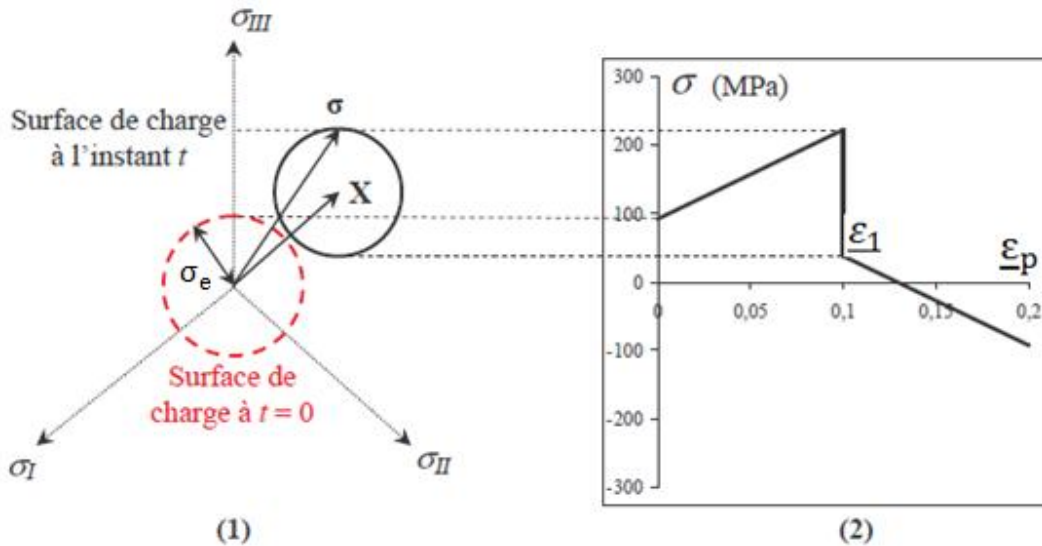


Figure I.25 : (1) représentation de l'écrouissage cinématique linéaire de Prager dans le plan des contraintes principales, et en traction/compression uni-axiales(2)

Conclusion :

La description si dessus, des procédés de mise en forme, à savoir : le découpage, l'emboutissage et le pliage pour le travail des métaux en feuilles ; le matriçage, l'extrusion et le laminage pour le travail des métaux à l'état massif, forme une étape préliminaire, pour introduire la notion d'élastoplasticité-endommagement décrivant le comportement des matériaux durant leurs mises en formes. Le recours aux modèles représentant cette notion, est devenu une nécessité évidente afin d'accéder à la simulation du procédé de Laminage, ce qui nous a incité à les mettre comme objet du chapitre suivant.

Introduction :

Les déformations élastiques et plastiques qui se situent au niveau des plans cristallins et des atomes respectent la cohésion de la matière. La fissuration détruit cette cohésion pour former au sein de la matière des micros discontinuités pouvant être volumiques ou surfaciques. Lorsque la taille de ces fissures atteint des dimensions de l'ordre du micron, on parlera de microfissures. Le terme « fissure » sera surtout utilisé à l'échelle des structures mécaniques mesurée en millimètre ou centimètre. On parle de matériau vierge s'il est dépourvu de cavités ou de fissures à l'échelle microscopique.

Un matériau est dit non endommagé si son comportement à la déformation est celui du matériau élaboré dans les meilleures conditions. Dans ce cas on supposera que l'endommagement est nul dans la configuration initiale.

Aussi au début des sollicitations, on négligera l'endommagement. On parle de stade final d'endommagement lors de la rupture de l'élément de volume représentatif (EVR), ou plus précisément dès l'apparition de fissure dont la taille varie en général entre 0.1 et 1 mm pour les métaux. On parle dans ce cas de fissure macroscopique.

I. Description de l'Endommagement:

Selon la composition microstructurale, il existe deux grandes familles d'endommagement, à savoir l'endommagement instantané et l'endommagement différé:

I.1.L'endommagement instantané :

Ici on se place dans le cadre des chargements monotones, les propriétés mécaniques des matériaux sont affaiblies localement ou globalement par des mécanismes physiques d'endommagement.

I.1.a Endommagement fragile :

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

I.1.b Endommagement ductile :

En formage de pièces par grandes déformations plastiques, le principal mécanisme de rupture est celui de la rupture ductile.

La photo de la Figure II.1 montre le faciès typique d'une rupture ductile dans un aluminium.

Sur cette image on observe clairement la formation de cavités autour des inclusions. Il est maintenant bien admis que le mécanisme de rupture ductile se décompose en trois étapes essentielles qui sont :

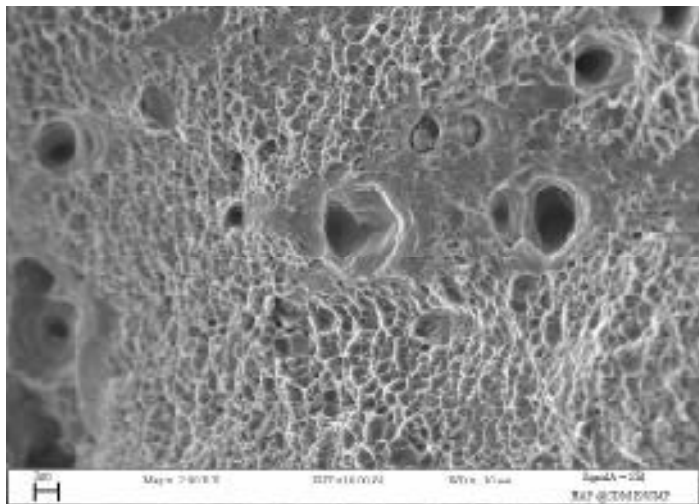


Figure II.1 : Faciès de rupture ductile d'un aluminium [HABRAKEN01]

- La nucléation ou germination de cavités de petites tailles,
- La croissance de ces cavités,
- La coalescence des cavités jusqu'à l'amorçage d'une fissure macroscopique.

Dans ce qui suit nous allons résumer le principe de chaque mécanisme. Pour cela nous utilisons le schéma de la Figure II.2 qui présente un métal contenant de nombreuses inclusions de différentes tailles, formes et phases (Figure II.2 (a)). Pour illustrer notre propos, nous isolons un EVR contenant deux inclusions, l'une sphérique et l'autre elliptique distantes d'une longueur l_0 l'une de l'autre (Figure II.2 (b)). Cet EVR est supposé soumis à une traction uniaxiale selon l'axe vertical.

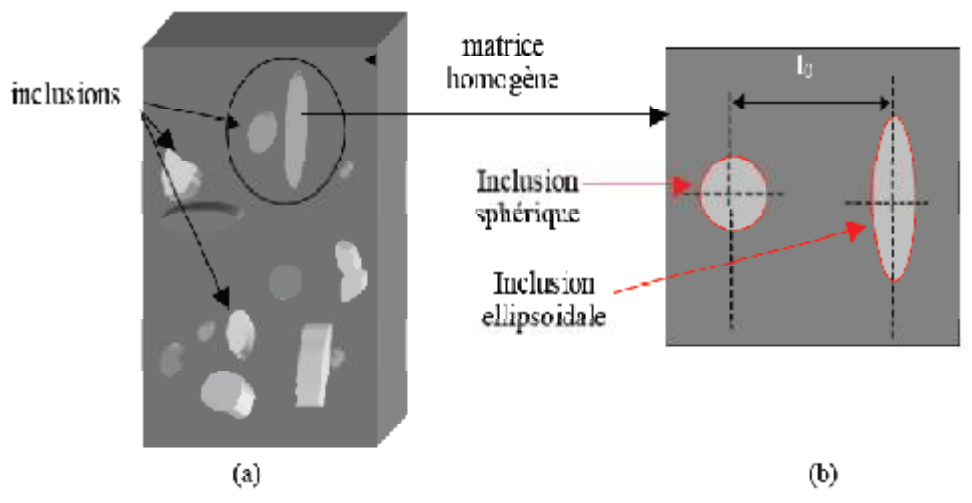


Figure II.2 : Schématisation d'un métal contenant diverses inclusions

Les principaux mécanismes physiques de l'endommagement ductile :

I.1.b.1. Nucléation ou germination :

Les matériaux métalliques sont des milieux fortement hétérogènes (au moins localement), constitués d'une matrice élasto-plastique et de particules de seconde phase ou inclusions quasi-rigides. Dans les aciers ces inclusions sont principalement: des oxydes, des sulfures ou encore plus complexes des oxysulfures et des nitrures. Ces inclusions interviennent dans la germination par le biais de leur interface qui présente de faibles propriétés mécaniques et spécialement en adhérence.

Dans un état non sollicité, les particules sont solidaires de la matrice. Cependant la différence de rigidité au niveau des interfaces matrice/inclusion donne localement une concentration de contraintes. L'application d'une sollicitation mécanique, donc d'une déformation, engendre la décohésion des inclusions (Figure II.3 (b)) de la matrice, ou la rupture de l'inclusion (Figure II.3 (a)). Le vide crée entre la matrice et les inclusions, ou entre les deux parties de l'inclusion rompue, est usuellement appelé une cavité (Figure II.3).

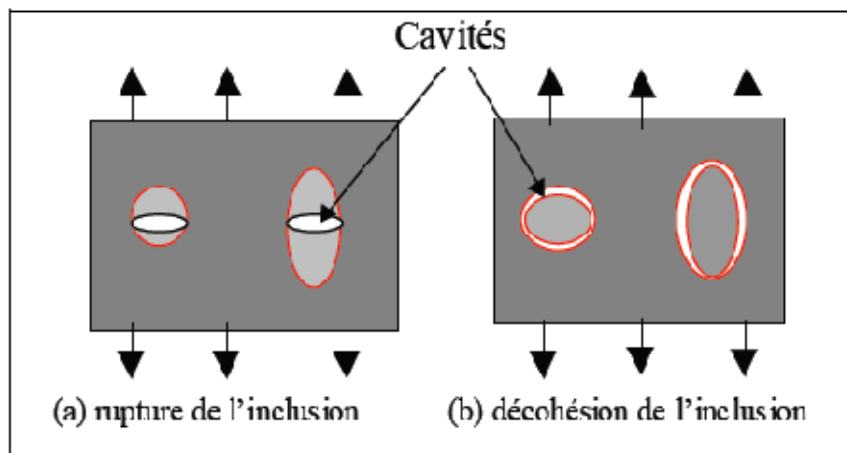


Figure II.3 : Schématisation du mécanisme de germination des cavités

L'ensemble inclusion-cavité se comporte en général, comme un trou et a fortiori comme un défaut dont la taille et la forme initiale sont peu différentes de celle de l'inclusion elle-même. Ce mécanisme de naissance de micro-cavités est appelé le stade de nucléation ou de germination qui est à l'origine de la rupture ductile. Toutefois la germination peut également s'effectuer par un endommagement de la matrice même au voisinage immédiat d'une particule, ce qui est difficilement observable expérimentalement lorsque la matrice est homogène. Notons que pendant ce stade de germination les cavités sont tellement petites qu'elles ne modifient pas la réponse macroscopique. En d'autres termes nous supposons que pendant le stade de nucléation des cavités, ni les propriétés élastiques ni les propriétés plastiques ne sont affectées.

I.1.b.2.Croissance des cavités :

Une cavité, générée durant le stade de la germination, croît selon un état de contrainte donné.

Cette croissance est pilotée par un écoulement plastique traduisant un écrouissage de la matière autour des cavités. En toute rigueur, la croissance commence avant que la germination ne soit achevée. Cet écoulement n'est pas uniforme et dépend beaucoup de l'état de contrainte et de la forme de la cavité (Figure II.4 (a)).

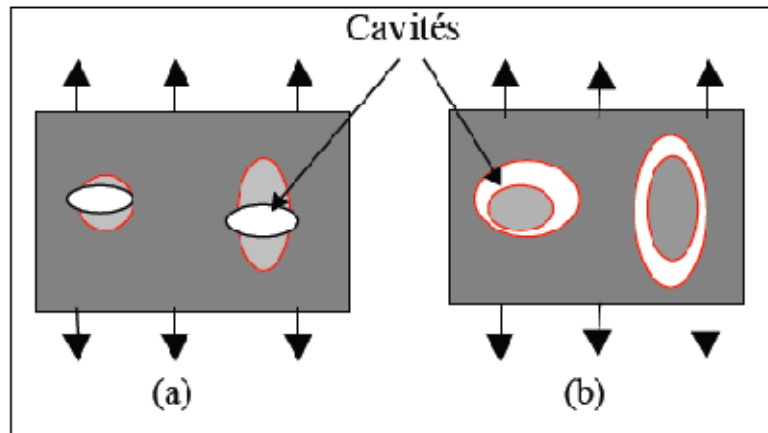


Figure II.4 : Croissance des cavités

Ces cavités se comportent comme des micro fissures, et les inclusions situées à l'intérieur ne jouent plus un rôle prépondérant si la décohésion est totale, dans le cas de la décohésion matrice/inclusion (Figure II.4 (b)). Néanmoins il importe dans certains cas d'en tenir compte.

En effet, si la décohésion entre la particule et la matrice n'est pas complète, le volume des cavités créées est très inférieur à celui de la particule qui lui a donné naissance. Dans cette phase l'interaction entre les cavités et la plasticité écrouissable de la matrice est essentielle.

On doit donc tenir compte de l'effet des cavités non seulement sur la plasticité mais aussi sur l'élasticité.

I.1.b.3. La coalescence des cavités :

Quand le ligament restant entre les deux cavités est suffisamment faible, l'interaction directe entre les deux cavités devient essentielle et ne peut plus être négligée. L'écoulement plastique localise alors dans le ligament et provoque sa rupture par cisaillement plastique (instabilité).

Ceci est montré schématiquement sur la Figure II.5 (a) et (b).

L'achèvement du stade de coalescence des cavités est supposé définir l'amorçage d'une fissure macroscopique de quelques millimètres carrés de superficie. La propagation de la fissure macroscopique est alors une succession d'étapes de coalescence se produisant dans la structure jusqu'à la rupture finale de cette dernière.

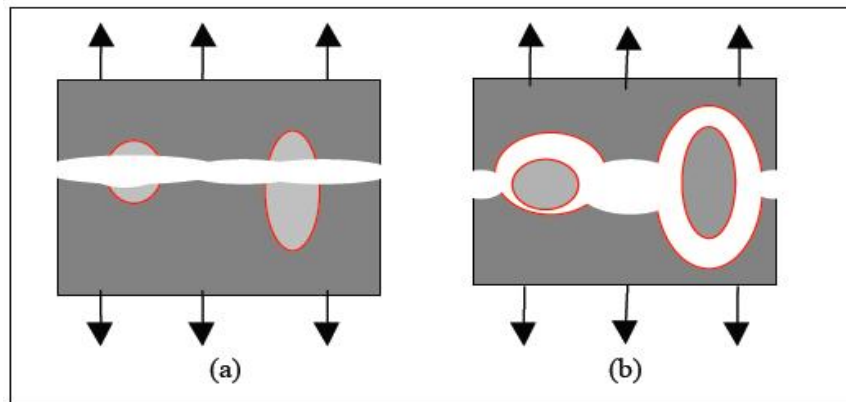


Figure II.5 : Fin du stade de coalescence conduisant à la rupture totale de l'EVR

La figure II.6 suivante, reporte la réponse contrainte-déformation, d'une éprouvette en traction axisymétrique (barreau cylindrique) décomposée en domaines, qui est reliée aux trois stades de la rupture ductile.

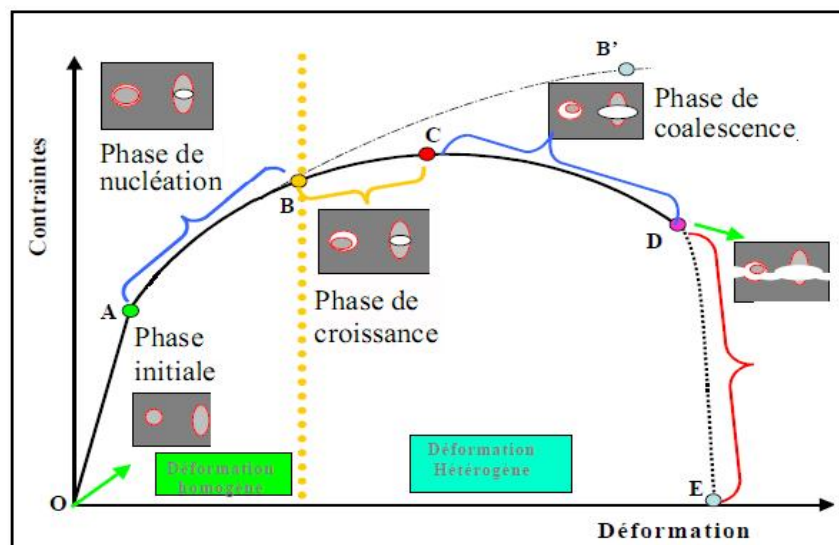


Figure II.6 : Réponse schématique d'une éprouvette en traction simple

OA : Déformation élastique linéaire homogène de l'éprouvette.

AB : Déformation plastique homogène de l'éprouvette. C'est le stade de nucléation des microcavités de tailles suffisamment petites pour ne pas modifier la réponse plastique.

Si on procède à une décharge élastique avant le point **B** alors on vérifiera que le module d'élasticité reste inchangé.

La courbe **ABB'** est la réponse homogène qu'aurait l'éprouvette si aucun défaut ne se développait.

BC : Les cavités croissent et leur effet commence progressivement à se faire sentir sur la réponse plastique et élastique du matériau. Les contraintes internes commencent à diminuer induisant indubitablement l'accélération de la chute du module tangent qui atteint zéro au point

C. C'est le stade de croissance des cavités pendant lequel le couplage comportement-endommagement ne peut plus être négligé. Notons toutefois qu'à partir du point **B** la déformation de l'éprouvette cesse d'être homogène et on assiste à la production d'une striction diffuse.

CD : Le mécanisme de coalescence des cavités commence au point **C**, avec le début de la striction dite localisée. En fait la distance entre les cavités est tellement faible qu'une localisation de l'écoulement plastique se produit dans les ligaments provoquant des zones de cisaillement intense. Ceci conduit à la rupture de ces ligaments par instabilité plastique reliant ainsi les cavités entre elles pour former une fissure macroscopique au point **D**. Pendant ce stade de coalescence des cavités, on observe un adoucissement ou un écrouissage négatif avec un module tangent négatif.

DE : Ce stade correspond à la propagation de la fissure macroscopique conduisant à la rupture finale de l'éprouvette. Pendant ce stade l'éprouvette devient une véritable structure mécanique contenant une fissure macroscopique en propagation.

I.2. Endommagements différés :

I.2.a Endommagement par fatigue :

Sous sollicitations cycliques, la déformation se concentre dans des bandes de glissement persistantes. Elle fait apparaître des intrusions et, petit à petit, des fissures suivent les bandes de glissement. C'est le premier stade de la fatigue, on parle alors de phénomène d'endommagement superficiel.

En mise en forme des matériaux, un lopin ne subit pas de sollicitations cycliques (ou périodiques). La rupture par fatigue du lopin formé est alors inexistante. Par contre les outillages (matrices) sont souvent le siège de sollicitations cycliques mécaniques (nombre de frappes) et/ou thermiques (forgeage à chaud). Dans ce cas l'endommagement par fatigue des outillages doit être pris en considération. Cet aspect est hors des objectifs de notre travail, néanmoins

l'extension de notre méthodologie pour traiter la rupture par fatigue thermomécanique des outillages ne pose pas de difficultés majeures.

I.2.b Endommagement par fluage :

A haute température où le fluage intervient, les joints de grains constituent les sites privilégiés pour l'apparition des cavités. Ces cavités croissent en taille et en nombre sous l'effet de la déformation plastique et de la diffusion des lacunes. On observe alors une rupture finale qui est intergranulaire. En mise en forme, les sollicitations sont tellement rapides qu'il est très rare d'observer des ruptures intergranulaires (par fluage) des pièces formées. Ceci dit, nous proposerons dans notre modélisation, la possibilité de cumul entre un endommagement plastique ductile, et un endommagement de fluage.

Notons que sous sollicitations cycliques à haute température, on observe une interaction entre les phénomènes de fatigue et de fluage dans la rupture des outillages.

I.3 Notion de forgeabilité :

La forgeabilité exprime la facilité (ou la difficulté) de mise en forme du matériau sans apparition de défauts microscopiques ou macroscopiques, de fissures, ou de replis. Elle constitue donc une limitation à la mise en forme et par conséquent un obstacle à son développement et à l'amélioration de ses performances.

Les défauts en mise en forme peuvent être regroupés en trois classes principales distinctes :

- les défauts de type surfacique qui donnent des altérations de la surface du matériau (phénomène pouvant être assez visible ou très peu suivant que la fissure soit ouverte ou fermée).
- les défauts de type volumique qui conduisent à une altération des propriétés mécaniques et par voie de conséquence à l'intégrité de la pièce.
- les défauts d'écoulement qui correspondent à une perturbation locale souvent importante du champ de déplacement.

Toutes ces classes de défauts sont rencontrées avec des conditions particulières à chaque cas dans presque tous les procédés de mise en forme (estampage, matriçage, extrusion, laminage...).

II. Représentations mathématiques du dommage ductile :

II.1 Définition de la variable d'endommagement :

Soit une structure endommagée, dans laquelle on considère un élément volumique soumis à une sollicitation dans le domaine plastique. Cet élément est suffisamment grand par rapport aux hétérogénéités du milieu. On parle alors d'élément volumique représentatif (E.V.R.).

Une manière de définir la valeur de l'endommagement en un point M du volume V, est de définir une variable tensorielle.

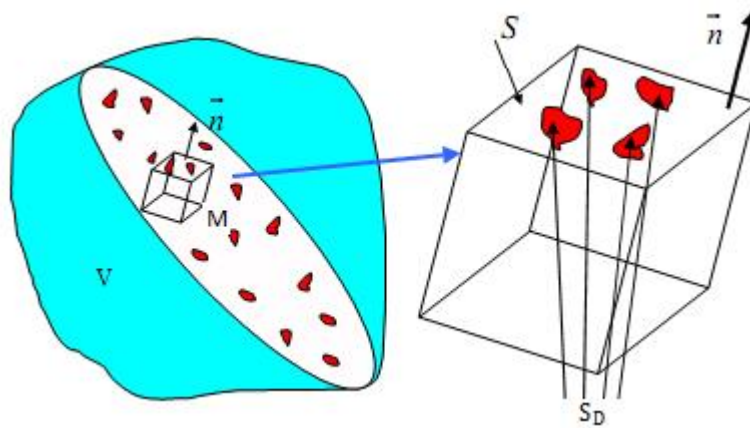


Figure II.7 : Représentation d'un E.V.R endommagé.

Soit S_D la surface résultant des défauts dans le plan perpendiculaire à $\vec{n}$, et S la surface totale de la section de la normale $\vec{n}$.

Cette variable est donnée en toute direction $\vec{n}$, par le rapport entre la surface S_D et la surface S .

$$D_n = \frac{S_D}{S} \quad \text{II.1}$$

D'un point de vue physique, la variable d'endommagement D_n , est l'aire relative des microfissures et des cavités coupées par le plan normal à la direction $\vec{n}$. On aura donc trois situations :

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

II.2 Modélisation de l'endommagement :

La modélisation de l'endommagement, peut se faire suivant deux approches différentes. L'une repose sur une démarche micromécanique alors que l'autre utilise une démarche macroscopique phénoménologique.

- a) L'approche micromécanique, consiste à décrire les mécanismes élémentaires de l'endommagement à l'échelle de la structure.

Cette approche est difficile à réaliser malgré son intérêt physique, vu le nombre considérable d'équations qui rend le calcul très long.

- b) L'approche macroscopique est purement phénoménologique. Elle est fondée sur l'introduction de variables d'état associées aux différents phénomènes révélés par l'expérimentation. Ces phénomènes sont décrits dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles.

II.3 Représentation phénoménologique de l'endommagement par des variables d'état, Le modèle de SAANOUNI :

Cette approche, est qualifiée de la mécanique de l'endommagement continu (M.E.C), consiste à faire appel à la notion de contrainte effective, elle est introduite par KACHANOV [Kac58] pour se rendre compte de la rupture des matériaux métalliques par fluage. Puis elle a été complétée par CHABOCHE [Cha78], et LEMAITRE [Lem85], et utilisée dans d'autres applications (rupture statique, fatigue...). Pour traduire l'endommagement des matériaux par cette approche, on utilise le formalisme de la thermodynamique des processus irréversibles avec variable d'états [Saa94].

II.3.1 Choix des variables d'états [Bel 02] :

Les variables d'états qui décrivent le comportement thermodynamique, se décomposent en deux parties :

- les variables observables, qui sont la déformation totale ε et la température T .
- Les variables internes, qui sont rassemblées dans le tableau ci-dessous, décrivant les phénomènes tels que :
 - 1) la plasticité :
 - o L'écoulement plastique ($\varepsilon_p, -\underline{\sigma}$) ;

- o L'écouvissage isotrope (r, R) ;
- o L'écouvissage cinématique ($\underline{\alpha}, \underline{X}$).

2) l'endommagement :

- o Distribution anisotrope des défauts ($\underline{D}, \underline{Y}$).

Variables d'états				Variables associées
Observables		internes		
Déformation totale	$\underline{\varepsilon}$			$\underline{\sigma}$
Température	T			
		Plasticité	$\underline{\varepsilon}_p$	$-\underline{\sigma}$
		Ecrouissage cinématique	$\underline{\alpha}$	$\underline{X}$
		Ecrouissage isotrope	r	R
		Endommagement	$\underline{D}$	$\underline{Y}$

Tableau II.1 : Variables d'états.

II.3.2 Notion de variables effectives :

Elle décrit d'une manière indirecte l'endommagement, elle est basée sur des hypothèses appropriées qui permettent de définir les variables d'état. Ces hypothèses sont :

- **Hypothèse d'équivalence en déformation élastique :**

Elle a été introduite par CHABOCHE [CHA77], afin d'obtenir la même déformation dans un EVR vierge avec le tenseur des contraintes effectives $\underline{\tilde{\sigma}}$, que dans un EVR endommagé avec le tenseur des contraintes $\underline{\sigma}$ actuelles.

La relation qui exprime la déformation en fonction de la contrainte, en élasticité dans un milieu sain s'exprime par :

$$\underline{\sigma} = \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\varepsilon}_e \quad \text{II.2}$$

Et pour un milieu endommagé :

$$\underline{\tilde{\sigma}} = \underline{\underline{\tilde{\Lambda}}} : \underline{\varepsilon}_e = \underline{\underline{\Lambda}}(\underline{D}) : \underline{\varepsilon}_e \quad \text{II.3}$$

Où $\underline{\underline{\Lambda}}$ et $\underline{\underline{\tilde{\Lambda}}}$ sont respectivement les tenseurs de rigidité d'ordre quatre, en milieux sain et endommagé.

A partir des relations (II.2) et (II.3), on obtient la relation entre la contrainte effective et actuelle :

$$\underline{\tilde{\sigma}} = \underline{\underline{M}}^{-1} : \underline{\sigma} \quad \text{Où} \quad \underline{\underline{M}} = \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\underline{\tilde{\Lambda}}}^{-1} \quad \text{II.4}$$

$\underline{\underline{M}}$ étant l'opérateur d'effet du dommage d'ordre quatre. Grâce à la relation (II.12), on aperçoit que $\underline{\underline{M}}$ permet le passage du tenseur des contraintes actuelle $\underline{\sigma}$, au tenseur des contraintes effectif $\underline{\tilde{\sigma}}$.

Dans le cas, où l'endommagement est nul ; $\underline{\underline{M}} = \underline{\underline{I}}$.

- **Hypothèse d'équivalence en énergie élastique :**

Dans le cas du comportement élastique endommageable, CODEBOIS et SIDOROF [COR82] ont proposé une démarche, qui consiste à utiliser une hypothèse d'équivalence en énergie élastique, qui fut généralisée aux cas inélastiques par SAANOUNI et AL [SAA94]. Elle postule pour un EVR sain, l'existence d'un potentiel élastique (énergie élastique) duquel dérive la déformation élastique :

$$W_e = \frac{1}{2} \underline{\sigma} : \underline{\varepsilon}_e = \frac{1}{2} \underline{\sigma} : \underline{\underline{\Lambda}}^{-1} : \underline{\sigma} \quad \text{II.5}$$

$$\underline{\varepsilon}_e = \frac{\partial W_e}{\partial \underline{\sigma}} = \underline{\underline{\Lambda}}^{-1} : \underline{\sigma} \quad \text{II.6}$$

La déformation de l'élément endommagé, est donnée par le même potentiel, elle s'écrit en fonction de la contrainte effective :

$$\widetilde{W}_e = \frac{1}{2} \underline{\tilde{\sigma}} : \underline{\tilde{\varepsilon}}_e = \frac{1}{2} \underline{\tilde{\sigma}} : \underline{\underline{\Lambda}}^{-1} : \underline{\tilde{\sigma}} \quad \text{II.7}$$

Avec : $\underline{\tilde{\varepsilon}}_e = \underline{\underline{M}}^T : \underline{\varepsilon}_e$

Alors, on pourra écrire :

$$W_e = \frac{1}{2} \underline{\sigma} : \underline{\varepsilon}_e = \frac{1}{2} \underline{\tilde{\sigma}} : \underline{\tilde{\varepsilon}}_e \quad \text{II.8}$$

- **Hypothèse d'équivalence en énergie totale :**

L'énergie totale W_T , étant la somme de l'énergie élastique W_e et l'énergie bloquée W^b due aux écrouissements isotrope et cinématique, avec ($W^b = W_{iso}^b + W_{cin}^b$).

$$W_T = W_e + W^b \quad \text{II.9}$$

A un EVR endommagé, occupant une configuration déformée, et dont l'état mécanique est défini par les couples de variables $(\underline{\varepsilon}_e, \underline{\sigma})$, (r, R) , $(\underline{\alpha}, \underline{X})$ et $(\underline{D}, \underline{Y})$, on lui associe un milieu fictif sain, occupant une nouvelle configuration représentée par les couples de variables

effectives $(\underline{\tilde{\varepsilon}}_e, \underline{\tilde{\sigma}})$, $(\underline{\tilde{\alpha}}, \underline{\tilde{X}})$, $(\underline{\tilde{r}}, \underline{\tilde{R}})$ et $(\underline{D} = 0, \underline{Y} = 0)$. Les énergies totales dans ces deux configurations sont égales.

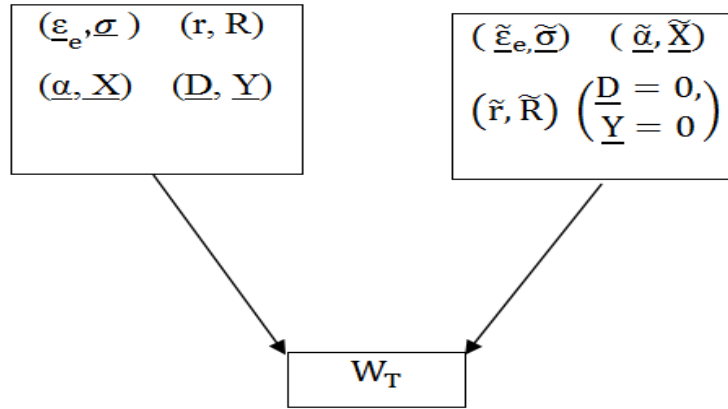


Figure II.8: Equivalence en énergie totale.

L'énergie cinématique bloquée dans un milieu non endommagé, s'écrit sous la forme :

$$W_{cin}^b = \frac{1}{2} \underline{\alpha} : \underline{\underline{C}} : \underline{\alpha} = \frac{1}{2} \underline{X} : \underline{\underline{C}} : \underline{X} \quad \text{II.10}$$

Et dans un milieu endommagé, est de la forme :

$$\tilde{W}_{cin}^b = \frac{1}{2} \underline{\tilde{\alpha}} : \underline{\underline{C}} : \underline{\tilde{\alpha}} = \frac{1}{2} \underline{\alpha} : \underline{\underline{N}} : \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{N}}^T : \underline{\alpha} = \frac{1}{2} \underline{\alpha} : \underline{\underline{\tilde{C}}} : \underline{\alpha} = \frac{1}{2} \underline{\tilde{X}} : \underline{\underline{\tilde{C}}} : \underline{\tilde{X}} \quad \text{II.11}$$

Avec :

$$\begin{cases} \underline{\tilde{X}} = \underline{\underline{N}}^{-1} : \underline{X} \\ \underline{\tilde{\alpha}} = \underline{\underline{N}}^T : \underline{\alpha} \end{cases} \quad \text{II.12}$$

Où : $\underline{\underline{C}}$ est le module d'écouissage cinématique,

$\underline{\underline{N}}$ est le tenseur d'effet de dommage pour l'écouissage cinématique.

Pour l'écouissage isotrope, l'équivalence en énergie bloquée est donnée par :

$$W_{iso}^b = \frac{1}{2} \underline{\tilde{R}} \cdot \underline{\tilde{r}} = \frac{1}{2} \underline{R} \cdot \underline{r} = \frac{1}{2} \underline{r} \cdot \underline{Q} \cdot \underline{r} = \frac{1}{2} \underline{\tilde{r}} \cdot \underline{Q} \cdot \underline{\tilde{r}} = \frac{1}{2} \underline{r} \cdot \underline{\tilde{Q}} \cdot \underline{r} = \tilde{W}_{iso}^b \quad \text{II.13}$$

Avec :

$$\begin{cases} \underline{\tilde{R}} = \frac{R}{\sqrt{1 - \|\underline{D}\|}} \\ \underline{\tilde{r}} = \sqrt{1 - \|\underline{D}\|} \underline{r} \\ \underline{\tilde{Q}} = Q(1 - \|\underline{D}\|) \end{cases} \quad \text{II.14}$$

Où, Q et $\tilde{Q}$ sont respectivement les modules d'écouissage isotrope du milieu sain et endommagé.

$\|\underline{D}\|$ Défini une norme appropriée de l'endommagement.

II.3.3 Potentiel et relation d'état :

Après avoir défini les variables d'états, on postule l'existence d'un potentiel thermodynamique duquel dérivent ces variables d'états. L'énergie libre de Helmholtz Ψ , est utilisée comme potentiel thermodynamique, qui dépend des variables observables et internes dans la configuration fictive.

a-Potentiel d'état :

Dans le cadre d'élastoplasticité, en H.P.P, les déformations n'interviennent que sous la forme de leur partition $\underline{\varepsilon}_e = \underline{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}_p$, et que les propriétés élastiques n'affectent pas les phénomènes d'écrouissage. Le potentiel énergie libre, se décompose en parties élastique, plastique et endommagement, il s'écrit de la manière suivante :

$$\psi = \rho \psi_e(\underline{\varepsilon}_e, \underline{D}) + \rho \psi_p(\underline{\varepsilon}_p, \underline{\alpha}, r, \underline{D}) \quad \text{II.15}$$

Il faut noter qu'ici le transfert thermique n'est pas pris en compte.

Après introduction de $\underline{D}$ dans ψ_e et ψ_p , on aura comme potentiel :

$$\rho \psi_e(\underline{\varepsilon}_e, \underline{D}) = \frac{1}{2} \underline{\varepsilon}_e : \underline{\tilde{\Lambda}} : \underline{\varepsilon}_e \quad \text{II.16}$$

$$\rho \psi_p(\underline{\varepsilon}_p, \underline{\alpha}, r, \underline{D}) = \frac{1}{2} \underline{\alpha} : \underline{\tilde{C}} : \underline{\alpha} + \frac{1}{2} \tilde{Q} r^2 \quad \text{II.17}$$

Avec :

$$\begin{cases} \underline{\tilde{\Lambda}} = \underline{M}^T : \underline{\Lambda} : \underline{M} \\ \underline{\tilde{C}} = \underline{N}^T : \underline{\Lambda} : \underline{N} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

b-Relations d'états :

Les relations d'états qui dérivent du potentiel seront alors :

$$\underline{\sigma} = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \underline{\varepsilon}_e} = \underline{\tilde{\Lambda}} : \underline{\varepsilon}_e \Rightarrow \underline{\sigma} = (1 - D) \underline{\Lambda} : \underline{\varepsilon}_e \quad \text{II.19}$$

Par analogie avec les relations précédentes, on peut définir les variables forces thermodynamiques associées aux variables internes :

$$\underline{X} = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \underline{\alpha}} = \underline{\tilde{C}} : \underline{\alpha} \Rightarrow \underline{X} = \frac{2}{3} (1 - D) \underline{C} : \underline{\alpha} \quad \text{II.20}$$

$$\underline{R} = \rho \frac{\partial \psi}{\partial r} = \tilde{Q} r \Rightarrow \underline{R} = (1 - D) Q r \quad \text{II.21}$$

$$\underline{Y} = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial \underline{D}} = \underline{Y}_e + \underline{Y}_a + \underline{Y}_r \quad \Rightarrow \quad \underline{Y} = \frac{1}{2} \underline{\varepsilon}_e : \underline{\underline{\Lambda}} : \underline{\varepsilon}_e + \frac{1}{3} \underline{\underline{C}} : \underline{\alpha} : \underline{\alpha} + \frac{1}{2} Q r^2 \quad \text{II.22}$$

Dans le cas général d'anisotropie, les tenseurs $\underline{Y}$ et $\underline{D}$ sont considérés de même ordre. Cette force thermodynamique représente le taux de restitution d'énergie totale. Elle se compose en une partie élastique $\underline{Y}_e$ et anélastique $\underline{Y}_a + \underline{Y}_r$, elles sont données par :

$$\begin{cases} \underline{Y}_e = \frac{1}{2} \underline{\varepsilon}_e : \frac{\partial \underline{\underline{\Lambda}}}{\partial \underline{D}} : \underline{\varepsilon}_e \\ \underline{Y}_a = \frac{1}{2} \underline{\alpha} : \frac{\partial \underline{\underline{C}}}{\partial \underline{D}} : \underline{\alpha} \\ \underline{Y}_r = \frac{1}{2} \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \underline{D}} r^2 \end{cases} \quad \text{II.23}$$

II.3.4 Potentiel des dissipations et relations complémentaires :

Le potentiel des dissipations Φ , peut être décomposé en un potentiel de dissipation plastique Φ_p , potentiel de dissipation d'endommagement Φ_d , la somme de ces deux termes représente la dissipation mécanique. Il s'écrit comme suit :

$$\Phi = \Phi_p + \Phi_d \quad \text{II.24}$$

Son expression est la suivante:

$$\Phi = \underline{\sigma} : \underline{\dot{\varepsilon}}_p - \underline{X} : \underline{\dot{\alpha}} - R \dot{r} + \underline{Y} : \underline{\dot{D}} \geq 0 \quad \text{II.25}$$

Avec:

$$\Phi_p = \underline{\sigma} : \underline{\dot{\varepsilon}}_p - \underline{X} : \underline{\dot{\alpha}} - R \dot{r} \geq 0$$

$$\Phi_d = \underline{Y} : \underline{\dot{D}} \geq 0$$

Pour simplifier la présentation des relations complémentaires, on se restreint à une surface unique. Alors, on considère un seul domaine dans l'espace des contraintes, avec un potentiel de dissipation : $F_p(\underline{\sigma}, \underline{X}, R, \underline{D})$.

$$F_p(\underline{\sigma}, \underline{X}, R, \underline{D}) = f + \frac{3}{4} \frac{a}{c} \underline{\tilde{X}} : \underline{\tilde{X}} + \frac{1}{2} \frac{b}{Q} \tilde{R}^2 \quad \text{II.26}$$

Avec : $f = \sqrt{(\underline{\tilde{\sigma}} - \underline{\tilde{X}}) : (\underline{\tilde{\sigma}} - \underline{\tilde{X}}) - \tilde{R} - \sigma_0}$

a et b sont respectivement, les coefficient de non linéarité de l'écrouissage cinématique et isotrope.

La dissipation s'écrit sous la forme :

$$\Phi = \underline{\sigma} : \underline{\dot{\varepsilon}}_p - \underline{X} : \underline{\dot{\alpha}} - R \dot{r} + \underline{Y} : \underline{\dot{D}} - \dot{\lambda}_p(F_p) \quad \text{II.27}$$

En tenant compte de l'extremum de la fonction Φ , on peut écrire de nouvelles relations du comportement :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \underline{\sigma}} = 0 \Rightarrow \dot{\underline{\varepsilon}}_p = \dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial \underline{\sigma}} = \frac{\dot{\lambda}_p}{1-D} \frac{(\underline{\sigma} - \underline{\bar{\sigma}})}{\|\underline{\sigma} - \underline{\bar{\sigma}}\|} \quad \text{II.28}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} = 0 \Rightarrow \dot{\underline{\alpha}} = -\dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial \underline{X}} = \dot{\underline{\varepsilon}}_p - \dot{\lambda}_p a \underline{\alpha} \quad \text{II.29}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial R} = 0 \Rightarrow \dot{r} = -\dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial R} = \frac{\dot{\lambda}_p}{\sqrt{1-D}} (1 - b \tilde{r}) \quad \text{II.30}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \underline{X}} = 0 \Rightarrow \dot{\underline{D}} = \dot{\lambda}_p \frac{\partial F_p}{\partial \underline{Y}} = \dot{\lambda}_p \frac{1}{(1-D)^\beta} \left(\frac{Y}{S}\right)^s \quad \text{II.31}$$

S, s, Y et β représentent les paramètres de l'endommagement.

Dans cette approche l'endommagement et la plasticité sont liés. En effet, il n'y aura apparition de l'endommagement, qu'à la seule condition qu'il y ait plasticité.

II.4. Représentation physique de l'endommagement ductile par des cavités, le modèle de GURSON :

Cette représentation est basée sur la cinématique des cavités, elle consiste à utiliser une variable scalaire de la fonction volumique des cavités, en supposant l'isotropie de l'endommagement. Pour l'anisotropie, on introduit des facteurs de changement de forme des cavités en fonction de la sollicitation appliquée. L'endommagement est décrit par le taux de croissance des cavités. Pour cela, Gurson [Gur77], a décrit un modèle de plasticité pour les matériaux poreux dans lequel, le critère de plasticité et le potentiel plastique, dépendent de la contrainte macroscopique et de la fraction volumique « f » des cavités, de la façon suivante :

$$F(\sigma_{eq}, \sigma_0, f) = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^2 + 2f \cosh\left(\frac{3P_H}{2\sigma_0}\right) - (1 + f^2) \quad \text{II.32}$$

σ_{eq} est la contrainte équivalente de von Mises, calculée à partir de la partie déviatrice du tenseur des contraintes de Cauchy $\underline{\sigma}$.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\sigma} : \underline{\sigma}} \quad \text{II.33}$$

P_H :Correspond à la partie hydrostatique de $\underline{\sigma}$.

σ_0 Étant la contrainte d'écoulement en traction simple.

f représente la porosité du matériau, c'est la fraction volumique des cavités. Elle est définie comme étant le rapport du volume des cavités $V_c = V_t - V_0$, par le volume de la matrice V_t à l'instant t, alors on aura :

$$f = \frac{V_t - V_0}{V_t} \quad \text{II.34}$$

Avec :

- V_t représente à l'instant «t », le volume total de la matrice avec les cavités.
- V_c : est le volume des cavités.
- V_0 : est le volume de la matrice sans cavités.

A partir du concept de conservation de la masse, l'évolution dans le temps de la fraction volumique s'écrit comme suit :

$$\dot{f} = (1 - f) \text{tr} \underline{D} \quad \text{II.35}$$

Où $\underline{D}$ est le tenseur des taux de déformation totale.

Ce type de modélisation, est utilisé en décomposant la fraction volumique des cavités en trois parties :

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{ger}} + \dot{f}_{\text{croiss}} + \dot{f}_{\text{coal}} \quad \text{II.36}$$

Le critère général de Gurson, ne prend pas en compte l'interaction entre les cavités, pour cela, TVERGAARD [TVE81] a proposé d'intégrer trois coefficients q_1 , q_2 et q_3 . Il a en outre remplacé la limite élastique σ_0 , par la contrainte d'écoulement $\underline{\sigma}$, pour inclure l'écrouissage isotrope du matériau. Afin de prendre en compte l'accroissement rapide des cavités pendant la phase de coalescence, TVERGAARD et NEEDLEMAN [TN84], ont introduit la fonction de porosité fictive f^* . L'équation (II.1) devient alors :

$$F(\sigma_{\text{eq}}, \underline{\sigma}, f) = \left(\frac{\sigma_{\text{eq}}}{\underline{\sigma}} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(\frac{3q_2 f^* P_H}{2\underline{\sigma}} \right) - (1 + q_3 f^{*2}) \quad \text{II.37}$$

Avec :

$$f^* = \begin{cases} f & \text{pour } f \leq f_c \\ f_c + \delta(f - f_c) & \text{pour } f > f_c \end{cases} \quad \text{et } \delta = \frac{f_u - f_c}{f_F - f_c} \quad \text{II.38}$$

Où

δ : représente l'accélération de la croissance de porosité.

f_c : La fraction volumique critique de vides.

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

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

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

- Ø les paramètres constitutifs, généralement sont fixés à : $q_1=1.5$, $q_2=1$ et $q_3=(q_1)^2$.
- Ø f_0 est la porosité initiale, elle est un paramètre lié au matériau.

- Ø f_c correspond au début de la coalescence, c'est un paramètre ajustable en utilisant la simulation numérique, et peut être déterminé à partir d'analyses microscopiques.

Conclusion :

Après avoir vu l'endommagement, nous avons présenté sa variable et les modèles décrivant les différents phénomènes physiques et phénoménologiques qui interviennent lors de la mise en forme des métaux. On s'est intéressé particulièrement à établir un modèle de comportement couplé à l'endommagement ductile dans le cadre de la thermodynamique des phénomènes irréversibles. Une formulation de ce couplage a été réalisée en isotropie. Afin de disposer d'un modèle suffisamment performant pour la simulation de procédés de mise en forme, nous n'avons pas tenu compte des effets thermiques.

Le troisième chapitre sera consacré à l'intégration numérique du modèle élastoplastique, couplé à l'endommagement dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS.

INTRODUCTION :

Dans le chapitre II, nous avons présenté l'ensemble des modèles censés décrire les principaux phénomènes macroscopique mise en jeu lors de la mise en forme de pièce métallique par grande déformations (emboutissage, hydroformage...). La généralisation de l'utilisation des outils virtuels pour l'optimisation des pièces mécaniques, a été possible grâce à l'apparition de logiciels performants et flexibles. Ce chapitre est consacré à la présentation des aspects numériques, liés à l'implémentation du modèle élastoplastique couplé à l'endommagement, dans le code de calcul ABAQUS.

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

I.1 Implémentation numérique :

I .1.1 Discrétisation spatiale :

- **Position du problème mécanique :**

Soit un solide constitué d'un matériau élastoplastique endommageable de volume initial V_0 occupant un domaine Ω_0 de frontière $\partial\Omega_0$ dans sa configuration initiale non déformée. Après déformation, le solide occupe une nouvelle configuration Ω de volume V et de frontière $\partial\Omega$. Le solide dans sa configuration actuelle comme il est illustré dans la figure (III.1), est soumis à :

- Une densité de force volumique $\vec{f}$ dans Ω ,
- Des efforts surfaciques $\vec{t}$ sur une partie $\partial\Omega_F$ de $\partial\Omega$,
- Des déplacements imposés $\vec{u}$ sur une partie $\partial\Omega_u$ de $\partial\Omega$.

Où $\partial\Omega_F$ et $\partial\Omega_u$ forment une partition de $\partial\Omega$.

Avec $\partial\Omega_F \cup \partial\Omega_u \subset \partial\Omega$ et $\Omega_F \cap \Omega_u = \emptyset$.

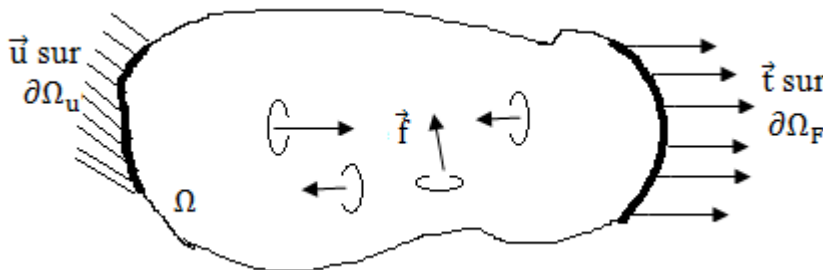


Figure III.1 : conditions aux limites.

Dans cette étude on utilise la formulation Lagrangienne totale, qui utilise comme configuration de référence, la configuration initiale Ω_0 . Et la formulation Lagrangienne actualisée qui utilise comme configuration de référence, la configuration d'équilibre Ω .

le problème à résoudre consiste à déterminer à chaque pas de chargement (incrément) les quantités mécaniques suivantes :

- Le champ (tenseur) des contraintes ($\underline{\sigma}$),
- Le vecteur champ de déplacement ($\underline{U}$),
- Le champ des déformations ($\underline{\varepsilon}$),
- Les variables internes : la déformation plastique cumulée $P(U)$ et l'endommagement $D(U)$.

Les inconnues du problème doivent vérifier les équations suivantes :

- Equation d'équilibre :

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

$$\vec{\ddot{U}} = \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} \quad \text{Champ d'accélération,}$$

- Les équations de compatibilité cinématique :

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

$$\vec{\dot{U}} = \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \quad \text{Champ de vitesse.}$$

- L'ensemble des équations de comportement dans Ω (équations (II. 28), (II.29), (II. 30) et (II. 31)) du chapitre II.

- Les conditions aux limites

$$\begin{cases} \underline{\sigma} \cdot \vec{n} = \vec{t} \text{ sur } \partial\Omega_F \\ \vec{U} = \vec{U}_d \text{ sur } \Omega_u \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Le principe des puissances virtuelles s'écrit comme suit :

$$P_i + P_e = P_a \quad \text{III.4}$$

Avec :

$$\begin{cases} P_i = -\int_{\Omega} \underline{\sigma} : \delta \underline{D} dv & \text{puissance des efforts intérieurs} \\ P_e = \int_{\Omega} \vec{f} \cdot \vec{\delta u} dv + \int_{\partial \Omega_F} \vec{t} \cdot \vec{\delta u} dS & \text{puissance des efforts extérieurs} \\ P_a = \int_{\Omega} \rho \vec{u} \cdot \vec{\delta u} dv & \text{puissance des efforts d'accélération} \end{cases} \quad \text{III.5}$$

Où $\vec{\delta u}$ est un champ de vitesses virtuelles .

$$\delta \underline{D} = (\text{grad} \delta \vec{u})^{\text{sym}}.$$

I.1 .2 Discrétisation spatiale du principe des puissances virtuelles (P.P.V) :

Considérant la discrétisation spatiale du domaine Ω , est approchée par un maillage de volume élémentaires V_e , occupant un domaine Ω_e (où e indique l'indice de l'élément). Le champ de déplacement réel et virtuel sont alors approchés par:

$$\begin{cases} \{u_e\} = [N_N] \{u_e^N\} \\ \{\delta u_e\} = [N_N] \{\delta u_e^N\} \end{cases} \quad \text{III.6}$$

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

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

$$\begin{cases} \{\dot{u}_e\} = [N_N] \{\dot{u}_e^N\} \\ \{\delta \dot{u}_e\} = [N_N] \{\delta \dot{u}_e^N\} \end{cases} \quad \text{III.7}$$

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

$$\{\ddot{u}_e\} = [N_N] \{\ddot{u}_e^N\} \quad \text{III.8}$$

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

$$[M_N^e] = \int_{V_e} \rho_0 [N_N] [N_N]^T dV_0 \quad \text{III.9}$$

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

$$[F_{e/int}^N] = \int_{V_e} [B_N^e]^T : \{\underline{\sigma}\} dV \quad \text{III.10}$$

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

Le vecteur des efforts extérieurs pour l'élément $\langle e \rangle$ est donné par :

$$[F_{e/ext}^N] = \int_{V_e} [N_N]^T \{\vec{f}\} dV + \int_{\partial\Omega_F} [N_N]^T \{\vec{t}\} d\Omega_F \quad \text{III.11}$$

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

$$\{I_e\} = ([M_N^e] \{\ddot{u}_e^N\} + [F_{e/int}^N] - [F_{e/ext}^N]) \{\delta \dot{u}_e^N\} \quad \text{III.12}$$

L'équilibre global de solide s'écrit :

$$\{I\} = \sum_e \{I_e\} = \sum_e ([M_N^e] \{\ddot{u}_e^N\} + [F_{e/int}^N] - [F_{e/ext}^N]) \delta \dot{U}^N = 0 \quad \text{III.13}$$

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

Après assemblage, cette équation s'écrit comme suit :

- Dans le cas statique :

$$F_{e/int}^N - F_{e/ext}^N = R^N(U^M) = 0 \quad \text{III.14}$$

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

- Dans le cas dynamique :

$$M^{NM} \ddot{U}^M + R^N(U^M) = 0 \quad \text{III.15}$$

I.2 méthode de résolution :

La résolution des problèmes (III.14) et (III.15), s'effectue à l'aide d'une analyse statique implicite, ou une analyse dynamique explicite, c'est cette dernière qui nous intéresse pour la simulation des procédés de fabrication, mais avant de passer à cette analyse, nous devons faire un aperçu sur la méthode statique implicite de Newton-Raphson.

I.2.1 Analyse statique implicite ((schéma de Newton-Raphson)) :

Pour résoudre le système (III.14), nous utilisons la méthode classique de Newton-Raphson, qui consiste à discrétiser le chargement total en plusieurs incréments

et à chercher les configurations $C^1, C^2, \dots, C^n$ correspondant aux différents pas de chargement. La détermination de la configuration C^{n+1} , à partir de la configuration C^n , se fait de une manière itérative, en effectuant un développement limité de $R(U)$,

au voisinage d'une solution approchée U_i , on obtient :

$$R(U_i + \Delta U_i) = R(U_i) + \frac{\partial R(U_i)}{\partial U_i} \Delta U_i + \dots = 0 \quad \text{III.16}$$

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

$$K_T(U_i) \Delta U_i = R(U_i) \quad \text{III.17}$$

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

$$R_e(U) = \int_{V_e} [B_N^e] : \{\underline{\sigma}\} J_v dV + \int_{V_e} [N_N]^T J_v \{\vec{f}\} dV + \int_{\partial\Omega_F} [N_N]^T J_F \{\vec{t}\} d\Omega_F \quad \text{III.18}$$

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

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

$$U_{i+1} = U_i + \Delta U_i \quad \text{III.19}$$

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

La résolution du système (III.14), dans ABAQUS/Standard est réalisée avec un algorithme incrémental implicite de Newton.

I.2.2 Analyse dynamique explicite :

Cette analyse, utilise un algorithme explicite qui consiste à obtenir une solution de système (III.15), à l'instant $t + \Delta t$ en fonction des quantités connues à l'instant t exclusivement. Comme toute méthode explicite, elle est conditionnellement stable en

fonction de la taille du pas Δt . Par contre, elle a l'avantage de ne pas nécessiter des Itérations ni de construction d'une matrice tangente. Cette méthode est implémentée dans le code ABAQUS/Explicit dédié à la simulation numérique des procédés de fabrication.

La règle explicite d'intégration, est tout à fait simple mais par elle-même, ne fournit pas l'efficacité informatique liée au procédé explicite de dynamique.

La clef de l'efficacité informatique du procédé explicite est l'utilisation de la matrice masse diagonale, car l'accélération au début de l'incrément, est calculée par :

$$\ddot{U}_i = M^{-1}R_i \quad \text{III.20}$$

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

$$\dot{U}_{i+\frac{1}{2}} = \dot{U}_{i-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{i+1} + \Delta t_i}{2} \ddot{U}_i \quad \text{III.21}$$

$$U_{i+1} = U_i + \Delta t_{i+1} \dot{U}_{i+\frac{1}{2}} \quad \text{III.22}$$

Avec $\dot{U}(0) = 0$ à $t=0$.

Cette stratégie de résolution, est facile à mettre en œuvre dans la mesure où elle ne nécessite ni calcul de la matrice tangente, ni d'effectuer des itérations. Il suffit de calculer et d'inverser la matrice masse, de calculer l'accélération $\ddot{U}_i$ au début de l'incrément (Eq III.20), puis la vitesse $\dot{U}_{i+\frac{1}{2}}$ au milieu de l'incrément (Eq III.21), et enfin, le déplacement U_{i+1} en fin d'incrément. Il est à noter que la matrice masse cohérente défini par (Eq III.9), peut être remplacée par sa matrice diagonale.

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

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

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{\max}} \quad \text{III.23}$$

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

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

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{\max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi) \quad \text{III.24}$$

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

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

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

$$\Delta t \approx \frac{L_{\min}}{C_d} \quad \text{III.25}$$

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

$$\Delta t = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \text{III.26}$$

Où : ρ est la densité du matériau, λ et μ Coefficients classiques de Lamé donnés par les équations suivantes :

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

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{III. 28}$$

Dans notre étude, on s'est limité à la résolution des problèmes (III.14) et (III.15), à l'aide d'une analyse dynamique explicite, pour cela nous présentons un algorithme de résolution pour un problème mécanique par cette analyse.

1. Calcul de la matrice masse : M
2. Conditions initiales : $t=t_0$; $u=u_0$
3. Estimation du pas de temps : $\Delta t_{n+1} = \frac{2}{w_{\max}}$
4. Mise à jour des déplacements pour l'incrément $< n >$:

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t_{n+1} \dot{U}_{n+\frac{1}{2}}$$
5. Calcul des forces internes : $[F_{e/int}^N]_n = \int_{v_e} [B_N^e]_n : \{\underline{\sigma}\}_n dV$
6. Calcul des forces externes :

$$[F_{e/ext}^N]_n = \int_{v_e} [N_N]^T \{\hat{f}\}_n dV + \int_{\partial\Omega_F} [N_N]^T \{\vec{t}\}_n d\Omega_F$$
7. Résolution des accélérations : $\{\ddot{u}_e\}_n = [N_N]_n \{\ddot{u}_e^n\}_n$
8. Calcul des nouvelles vitesses : $\dot{U}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{U}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \ddot{U}_n$
9. Si le nombre d'itérations est inférieur au nombre maximal de pas $t_{n+1} \leq T$?
ü Si oui : On retourne à l'étape 3 ;
ü Si non : Fin.

Figure III.2 : Algorithme de résolution pour un problème mécanique par un schéma d'intégration dynamique explicite.

Dans ABAQUS, l'implémentation du modèle de SAANOUNI, se fait à l'aide d'une subroutine VUMAT, prenant compte de l'ensemble des paramètres de ce modèle, avec un schéma de résolution Dynamique Explicite. Le modèle de GURSON est déjà implémenté par défaut.

Conclusion :

Le développement de l'ingénierie simultanée propulsée par des exigences de réduction des coûts et du temps de fabrication, ont poussé les industriels à s'intéresser de plus en plus à la simulation numérique. La généralisation de l'utilisation des outils virtuels pour l'optimisation des pièces mécaniques, a été possible grâce à l'apparition de logiciels performants et flexibles. Il est utile de développer dans le contenu de ce chapitre, les techniques mathématiques, utilisées pour résoudre le problème couplé du comportement élastoplastique-endommagement, et l'implémentation de ces modèles, dans le programme calcul par élément finis ABAQUS, afin de faire la simulation numérique du Laminage, qui fera l'objet de quatrième chapitre.

Introduction :

Ce chapitre, illustre les résultats numériques obtenus par notre travail, qui est basé sur la simulation numérique de procédé de mise en forme par laminage, dans le code de calcul par éléments finis ABAQUS, et pour prévoir les conditions de travail pour ce procédé.

. Cette étude se fera sur les deux modèles présentés dans le chapitre II, le modèle de SAANOUNI et le modèle de GURSON (GTN), les résultats obtenus feront objet de discussion.

Par l'étude d'un élément de volume représentatif en test homogène, pour déterminer les paramètres du matériau 304L, puis en deuxième lieu, nous allons présenter une simulation numérique du procédé de laminage.

Comme matériaux nous avons choisi l'étude d'un acier inoxydable 304 L.

La courbe de traction expérimentale est donnée par la figure IV.1

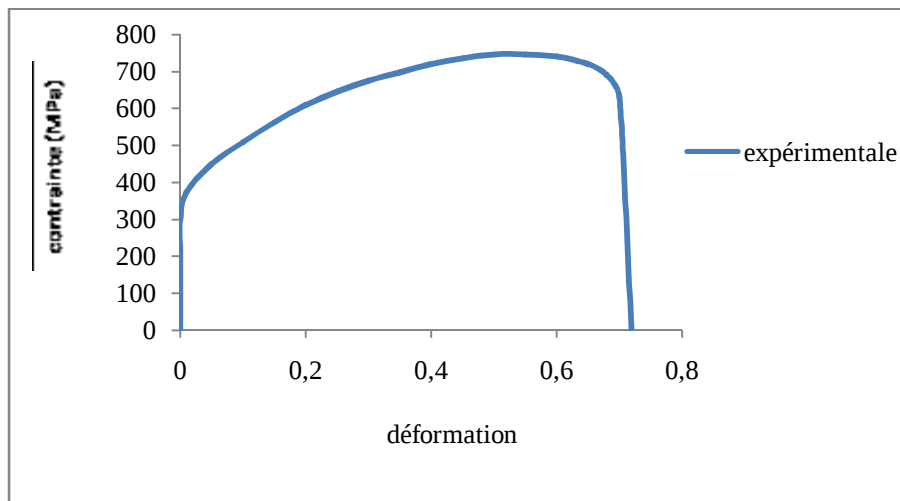


Figure IV. 1 : courbe expérimentale Contrainte-Déformation pour l'acier 304L

I. Test homogène :

Ce test a pour but de déterminer les paramètres matériaux numériques de l'acier 304L, afin de l'utiliser pour la simulation de l'essai de laminage en 3D, en considérant des éprouvettes normalisées.

1. Pour le modèle de SAANOUNI :

- Module d'écrouissage isotrope Q ,
- Coefficient d'écrouissage isotrope non linéaire b ,
- Module d'écrouissage cinématique C ,
- Coefficient d'écrouissage cinématique non linéaire a ,
- Les paramètres de l'endommagement (S , s , et $\dots$).

2. Pour le modèle de GURSON (GTN) :

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

Ces paramètres seront déterminés par la simulation numérique sur le logiciel ABAQUS, par étalonnage.

Nous nous plaçons dans un cadre schématisé par la figure(IV.2), représentant une traction unidirectionnelle d'un élément de volume représentatif (EVR) en test homogène, sous une sollicitation extérieure monotone, en imposant un encastrement d'un côté et un déplacement $u = 1 \text{ mm}$ d'un autre côté suivant l'axe OY.

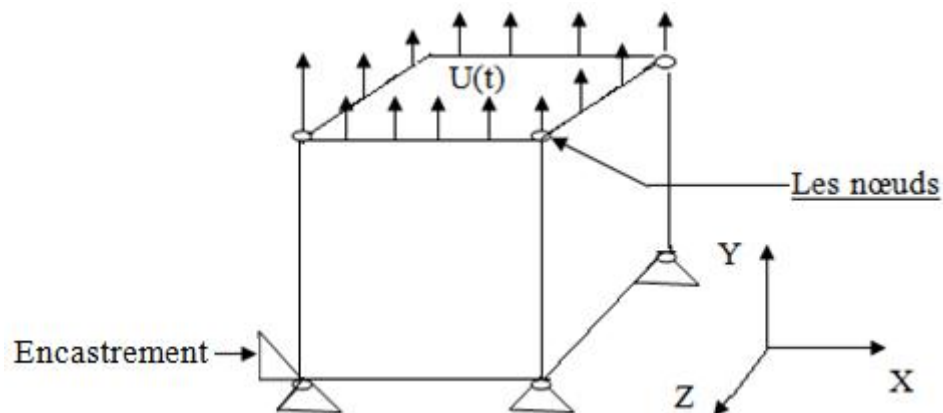


Figure IV.2: schématisation de l'élément de volume représentatif (EVR).

II. Propriétés du matériau :

Pour le modèle de Gurson les caractéristiques du matériau utilisé sont données dans les tableaux suivants :

• Caractéristiques élastiques :

Caractéristiques élastiques du matériau

$E(\text{MPa})$	μ	$\sigma_e(\text{MPa})$
200000	0.28	390

Tableau IV.1 : caractéristiques élastiques de l'acier 304L

- Caractéristiques plastiques

σ_p	ε
390	0
457.14	0.0175
471.14	0.035
495.23	0.055
523.8	0.0725
561.9	0.11
590.47	0.1425
614.28	0.18
640.47	0.215
661.9	0.255
673.8	0.295
688.09	0.33
704.76	0.37
711.9	0.41

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

Pour le modèle de GURSON (GTN), il s'agit de déterminer la porosité

Critique f_c (porosité de début de coalescence) et la porosité à la rupture f_f .

Dans notre cas, nous avons choisi les valeurs des paramètres q_1 , q_2 , q_3 et f_c comme suit :

Paramètres	q_1	q_2	q_3	f_c	f_f
Valeurs	1.5	1	2.25	0.0002	0.000185

Tableau IV.3 : paramètres du modèle de GURSON(GTN) pour l'acier 304L.

Ces paramètres ont été obtenus par le calibrage de la courbe numérique à la courbe expérimentale, cela est montré par la figure IV.4:

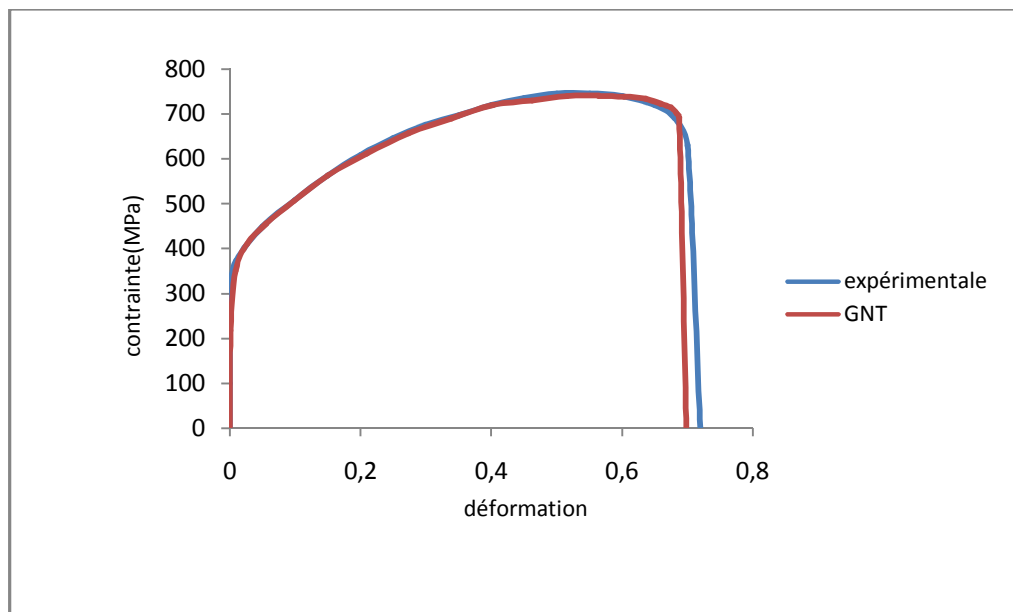


Figure IV.3 : Superposition de la courbe expérimentale et numérique de La Contrainte-Déformation.

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

Pour le modèle de SAANOUNI, la simulation numérique nous a conduits à déterminer les paramètres non linéaires d'écrouissage isotrope, tels que le module et le coefficient, qui sont respectivement $Q = 2600\text{Pa}$ et $b = 3\text{ MPa}$, ainsi que le module et le Coefficient d'écrouissage cinématique non linéaires qui ont pour valeurs respectivement $C=0$ et $a=0$.

Le jeu sur les paramètres S , s , β et Y_0 permettant de décrire le modèle d'endommagement de SAANOUNI, se fait par la superposition de la courbe expérimentale présentée par la figure (IV.1), et la courbe obtenue par la simulation numérique, dans le cas d'un comportement couplé puis non couplé est présenté sur la figure(IV.3).

Ce jeu de paramètre a donné les valeurs suivantes :

Paramètres	$S(\text{MPa})$	S	β	$Y_0(\text{MPa})$
Valeurs	35	50	1.2	60

Tableau IV.4 : paramètres du modèle d'endommagement pour l'acier 304L.

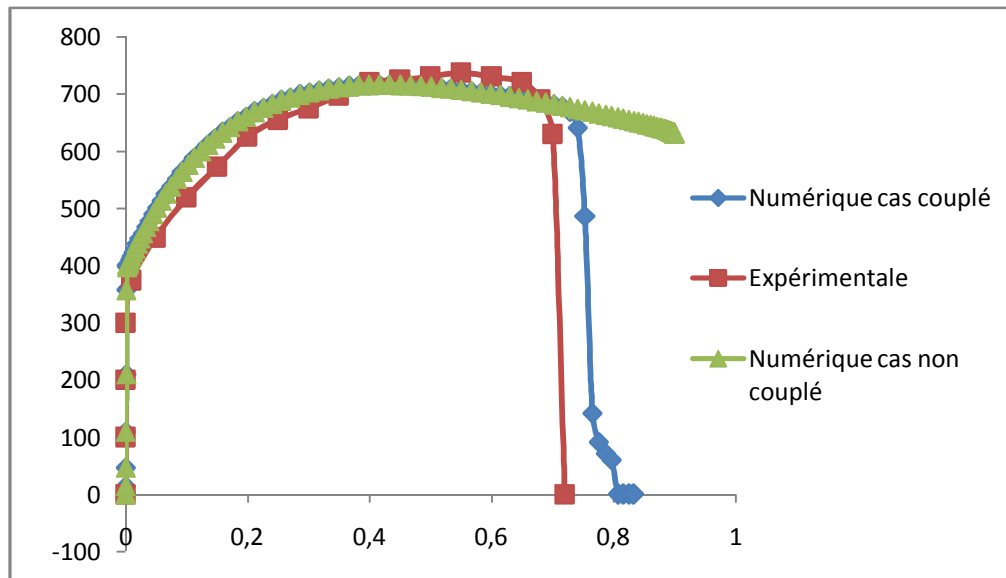


Figure IV.4: Superposition des courbes Contrainte-Déformation (SAANOUNI).

La courbe Contrainte-Déformation illustrée par la figure(IV.3), fournit le résultat attendu dans le cas d'un test homogène, pour chacun des cas de comportement, couplé et non couplé. L'endommagement se manifeste par un effet adoucissant sur la contrainte dans le cas couplé, induisant la diminution progressive du niveau de contraintes évoluant à une diminution brutale, quand l'endommagement approche la valeur critique de rupture ($D_c = 0.99$).

III. Simulation numérique de laminage :

La fabrication des pièces à partir des tôles, est généralement réalisée sur des presses, Les critères de qualité du produit étant de plus en plus sévères en termes de précision géométrique et de performances mécaniques, l'optimisation du procédé de mise en forme est très souvent rendue nécessaire, la réussite d'un produit fabriqué par emboutissage, estampage ou plus particulièrement par laminage, dépend essentiellement de trois facteurs liés entre eux, qui sont :

- ü les caractéristiques physiques de la tôle,
- ü la géométrie des outils,
- ü la lubrification.

IV. Description des conditions de la simulation :

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

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

Les dimensions de l'outillage et du rail utilisés pour effectuer l'essai de laminage sont indiquées :

- § Rayon de laminoir = 170mm
- § Largeur de laminoir = 50mm
- § Longueur de la tôle = 224mm
- § Largeur de la tôle = 48mm
- § Epaisseur de la tôle = 20mm

IV.1. Les conditions aux limites et maillage :

Pour s'approcher des conditions d'un laminoir réel, nous avons imposé soigneusement des conditions aux limites. Un cylindre d'appui est juxtaposé à chaque cylindre de travail, nous avons simplement représenté leur action en imposant un déplacement vertical nul sur les centres des cylindres de travail, et nous avons considéré les cylindres de travail comme indéformables. D'autre part, nous avons également imposé un déplacement longitudinal nul sur leurs centres, les cylindres étant bloqués en translation dans les directions longitudinales et transverses.

Dans un laminoir, la tôle repose sur un support horizontal. Pour représenter l'action de ce support, il suffit d'imposer un déplacement vertical nul sur au moins un point de la tôle en amont des cylindres. Ce point ne doit pas entrer en contact avec les cylindres au cours du calcul, car le blocage vertical entrerait en contradiction avec la réduction d'épaisseur résultant du laminage. Nous avons donc imposé un déplacement vertical nul sur le bord arrière de la tôle, qui n'est jamais laminé au cours de notre calcul, car nous n'avons pas fait une passe complète, et finalement, nous n'avons pas imposé des tensions sur la tôle en entrée et en sortie. Il s'agit donc de la modélisation d'un laminoir à froid.

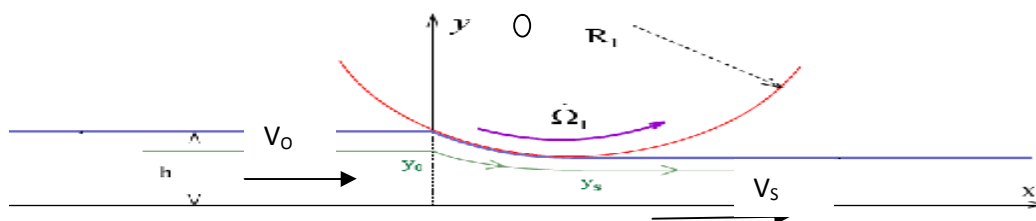


Figure IV.5 : Schématisation de l'essai de laminage

Le maillage constitue le support géométrique des éléments finis qui servira à la modélisation des phénomènes physiques. Le nombre d'éléments et de nœuds sont représentés dans le tableau suivant

	Nombre d'éléments	Nombre de nœuds	Type d'éléments	Type d'interpolation
rail	1840	3439	C3D8R	Linéaire quadratique
roller	Sans maillage			

Tableau IV.5 : le maillage utilisé

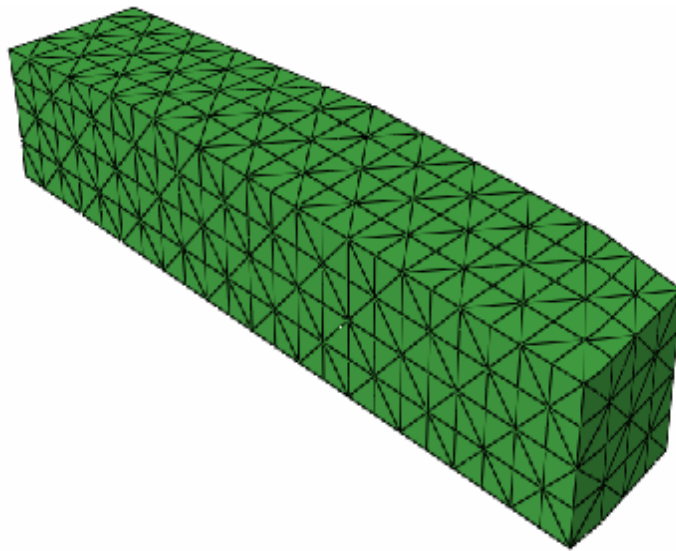


Figure IV.6 : Maillage utilisé pour la plaque

V. Résultats et analyse des essais de simulation :

A partir des essais de simulation nous avons abouti aux résultats suivants :

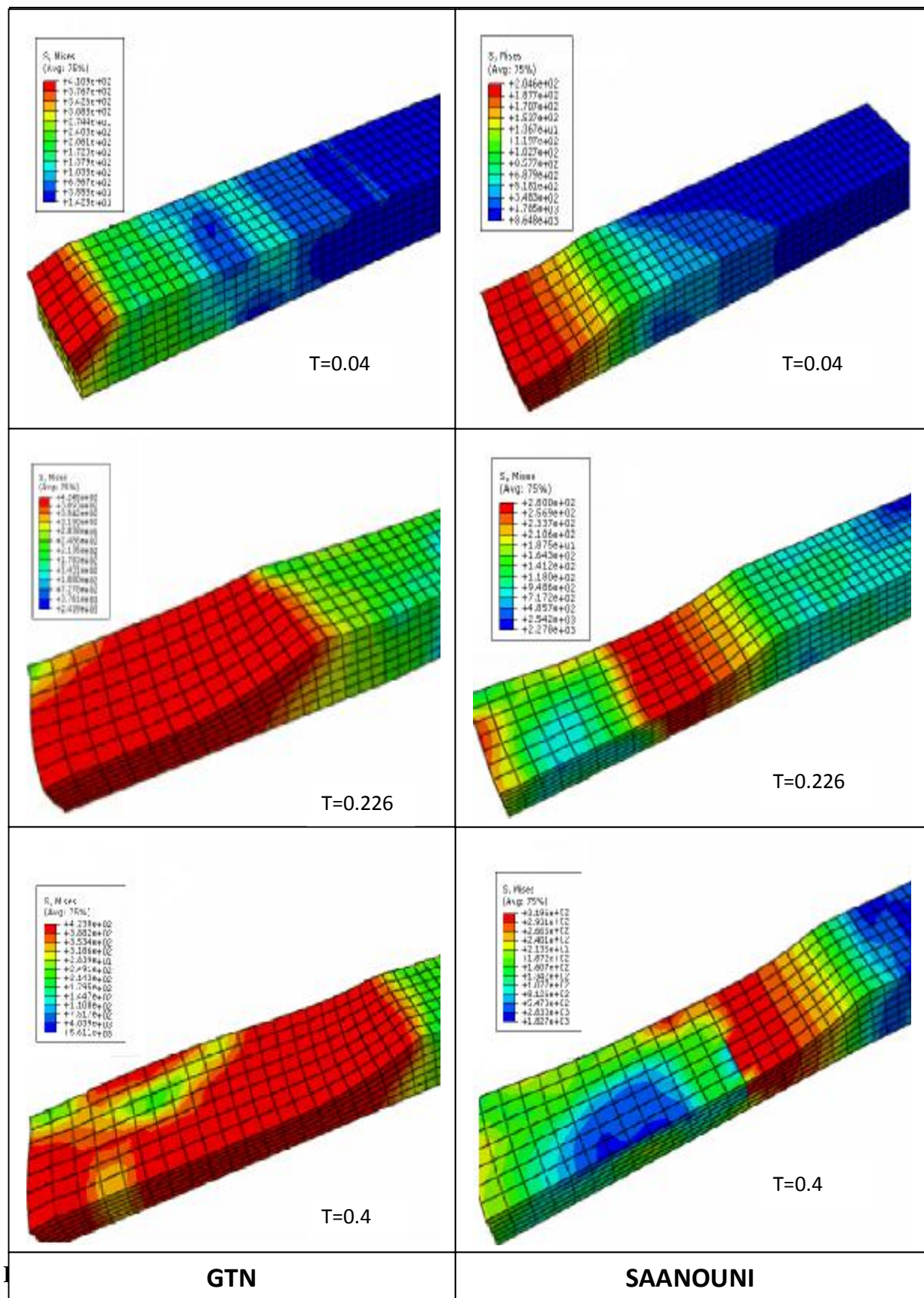


Tableau IV. 6: Représentations des zones endommagées de la section laminée de l'éprouvette pour les deux modèles.

On voit que les résultats des deux simulations réalisées sur les deux modèles, ne correspondent pas parfaitement entre eux, Cette différence peut s'expliquer par : l'influence des paramètres géométriques du laminage, et les conditions du contact outil-pièce.

V.1. Etude de l'influence de pat de pénétration sur les forces de réaction de rouleau :

Les calculs ont été menés par notre simulations numérique jusqu'à 100% de la course du rouleau. Différents pénétration ont été réalisé (0.1, 0.2, 0.3, 0.4 et 0.5 mm) La figure (IV.7) représentent les courbes numériques pour le modèle de SAANOUNI, et le figure (IV.8) représentent celles du modèle GTN.

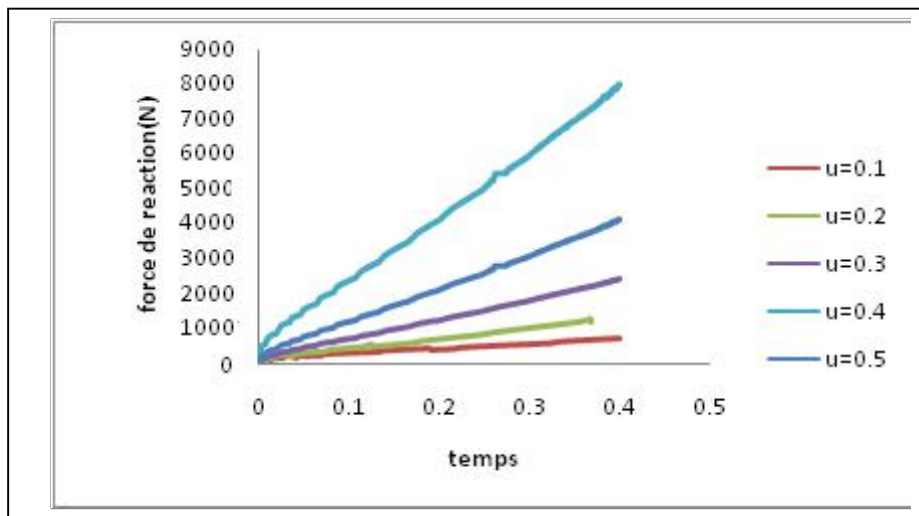


Figure IV.7 : l'influence de pat de pénétration sur les forces de réaction de rouleau (SAANOUNI)

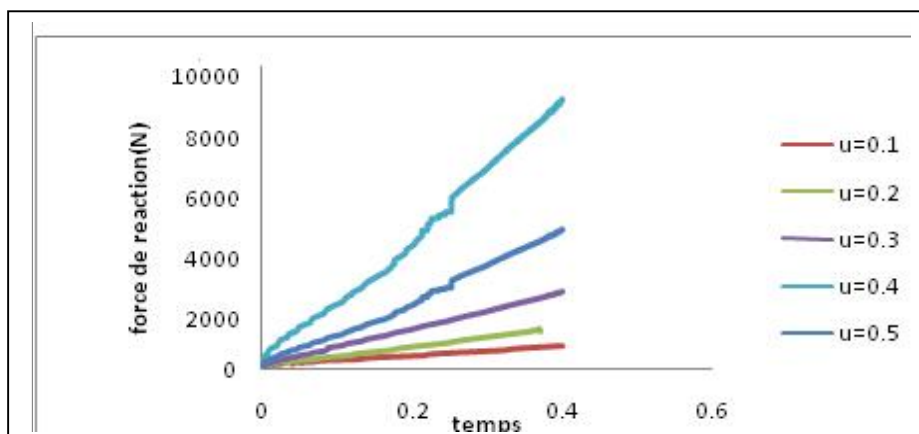


Figure IV.8 : l'influence de pat de pénétration sur les forces de réaction de rouleau (GTN)

Ces courbes montrent les évolutions de la force de réaction sur le rouleau, en fonction de sa pénétration. Pour un déplacement très faible, l'évolution de la force de laminage a été portée pour différentes épaisseurs de la tôle à l'entrée. Nous constatons que l'effort est une pente croissante. Lorsque l'on passe d'une pénétration de 1mm à 5mm.

V.2. Etude de l'influence de vitesse de rotation sur les contraintes :

Dans cette simulation, on a étudié l'influence des vitesses de rotation sur les contraintes, dont on a utilisé

- un rouleau de rayon $R = 170$ mm.
- Les vitesses de rotation du rouleau sont ($V = 6, 12, 18, 50$ tr/mn)

On fait varier la vitesse de rotation du rouleau on obtient les différentes contraintes équivalentes qui sont illustrées par les figures suivantes

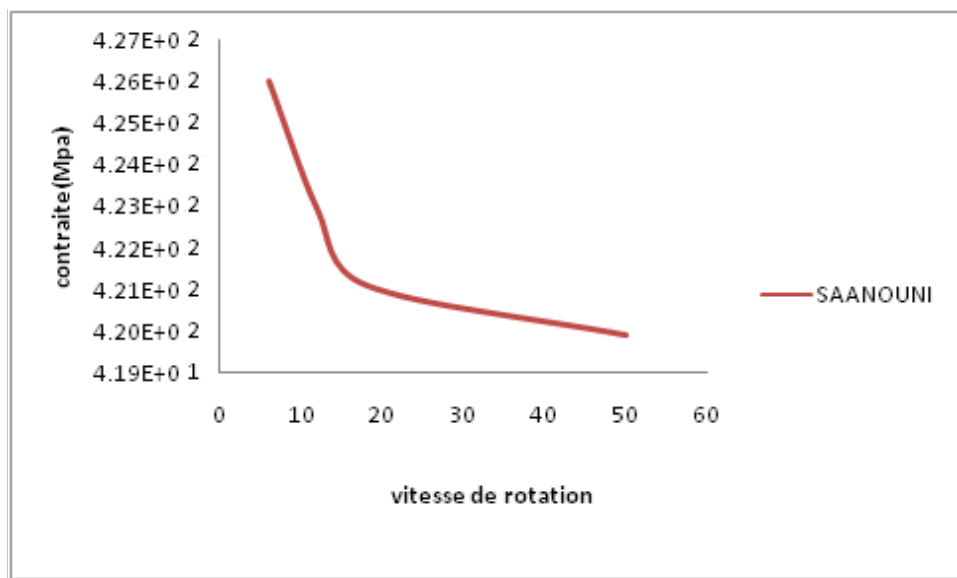


Figure IV.9 : l'influence de la vitesse de rotation sur les contraintes (SAANOUNI)

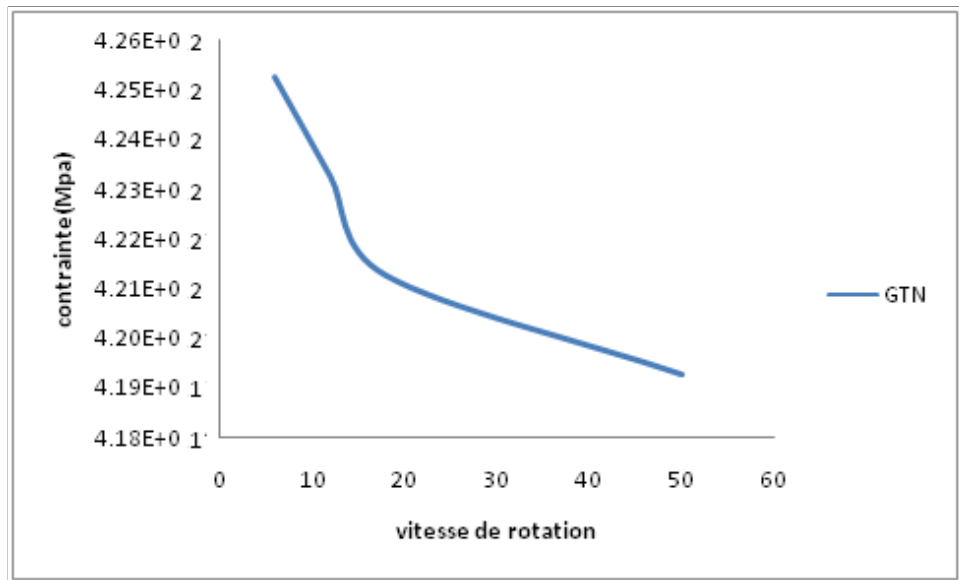


Figure IV.10 : l'influence de la vitesse de rotation sur les contraintes (GTN)

Ces courbes montrent la variation des contraintes en fonction de la vitesse de rotation. Nous avons pu constater que les contraintes diminuent à chaque fois que la vitesse de rotation augmente, ce qui semble logique, et peut s'expliquer par les effets importants des frottements, entre le rouleau et la tôle.

V.3. Etude de l'influence de l'avancement de rouleau :

A l'aide de notre simulation, nous avons abouti aux résultats suivants :

Pour les deux modèles, SAANOUNI et GURSON, Les courbes numériques est donnée par les figures suivante

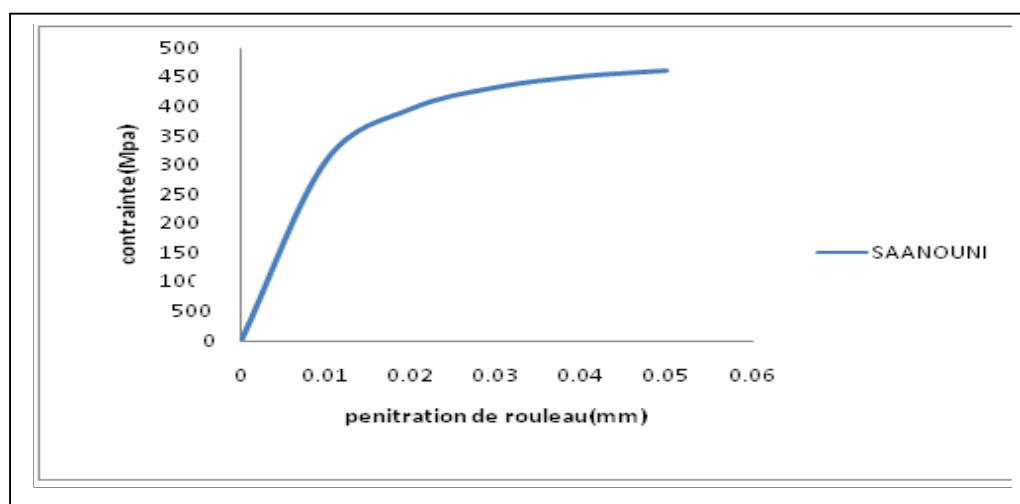


Figure IV.11 : l'influence de pénétration de rouleau sur les contraintes(SAANOUNI)

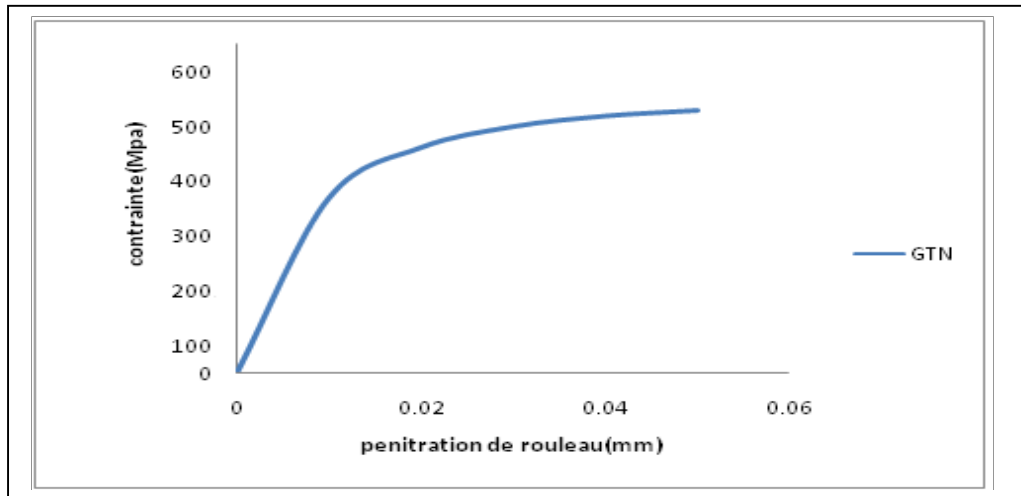


Figure IV.12 : l'influence de pénétration de rouleau sur les contraintes (GTN)

Pour les deux courbes numériques, on voit qu'au début du laminage, augmente d'une manière linéaire très abrupte. C'est la zone où l'effort se développe dans le domaine élastique du matériau, jusqu'à atteindre une valeur qui correspond au moment de la plastification de la section de la tôle. Ensuite les courbes s'incurvent doucement, ce qui correspond au domaine élastoplastique du matériau.

V.4. Etude de l'influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction :

Ces courbes montrent les évolutions de la force de réaction, en fonction de pénétration de rouleau

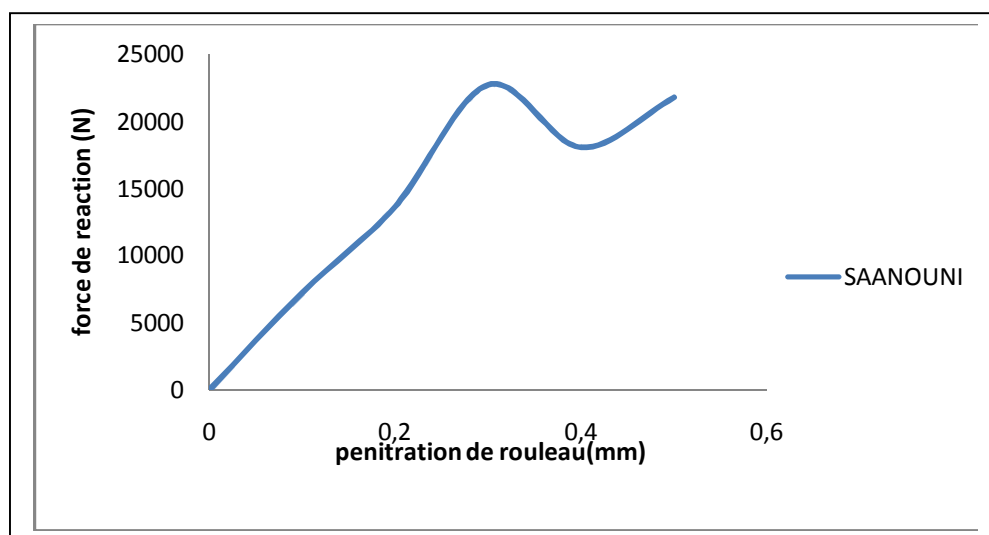


Figure IV.13 : Influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction (SAANOUNI)

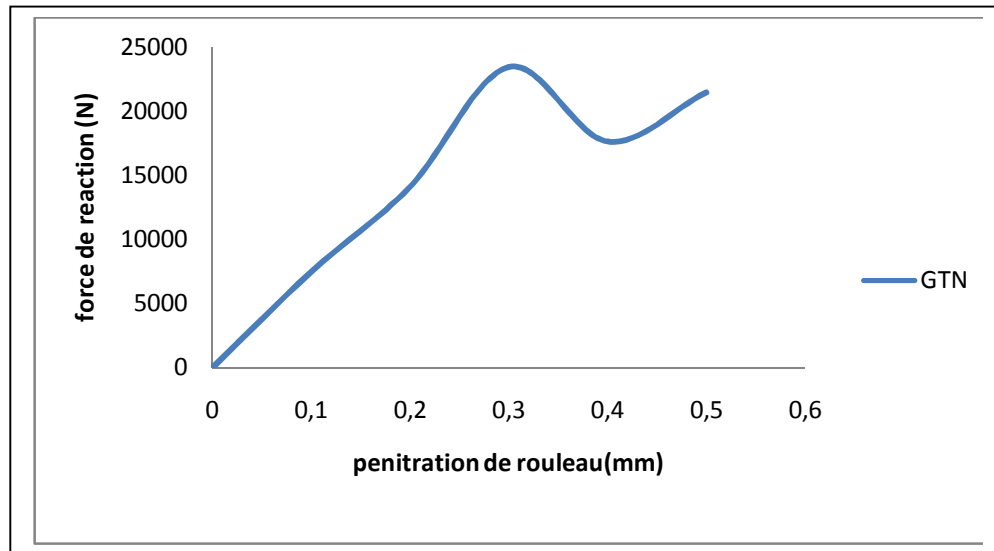


Figure IV.14 : Influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction (GTN)

La force de réaction augmente très rapidement, jusqu'à ce que la pénétration de rouleau atteigne 0.3mm, ensuite ça décroît. Ceci correspond essentiellement à l'accroissement des contraintes nécessaires à la plastification de la section d'éprouvette.

VI. Comparaison des résultats :

Si on compare notre simulation pour les deux modèles (GTN, SAANOUNI) on peut dire que les résultats de notre simulation sont quasi semblables, les figures suivante le montre

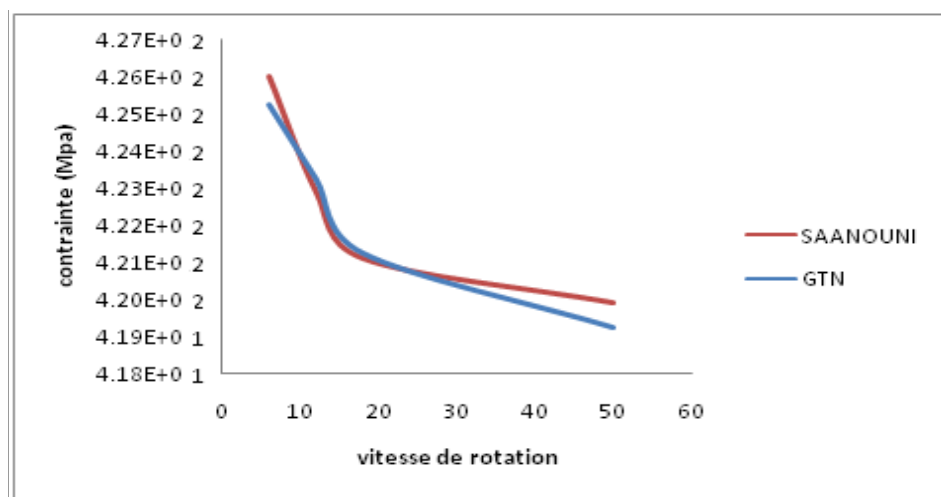


Figure IV.15 : l'influence de vitesse de rotation sur les contraintes

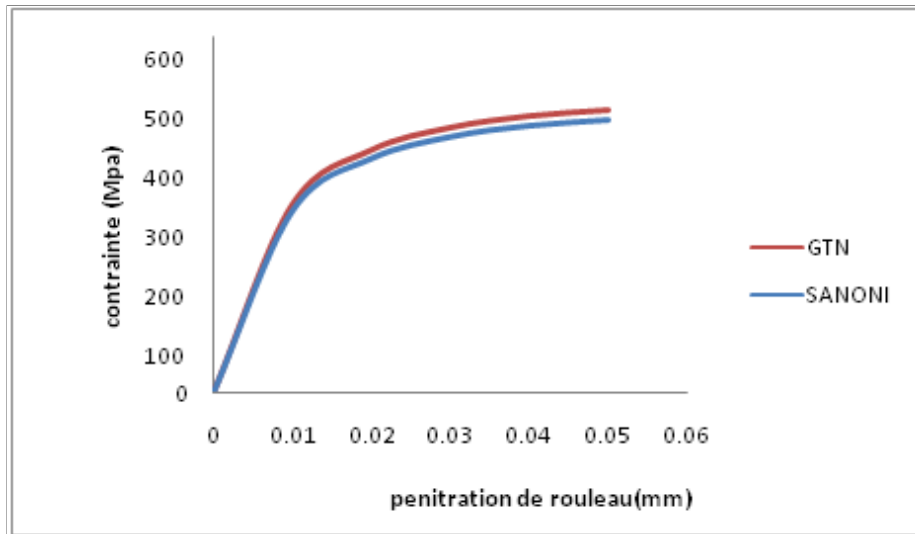


Figure IV.16 : L'influence de pénétration de rouleau sur les contraintes

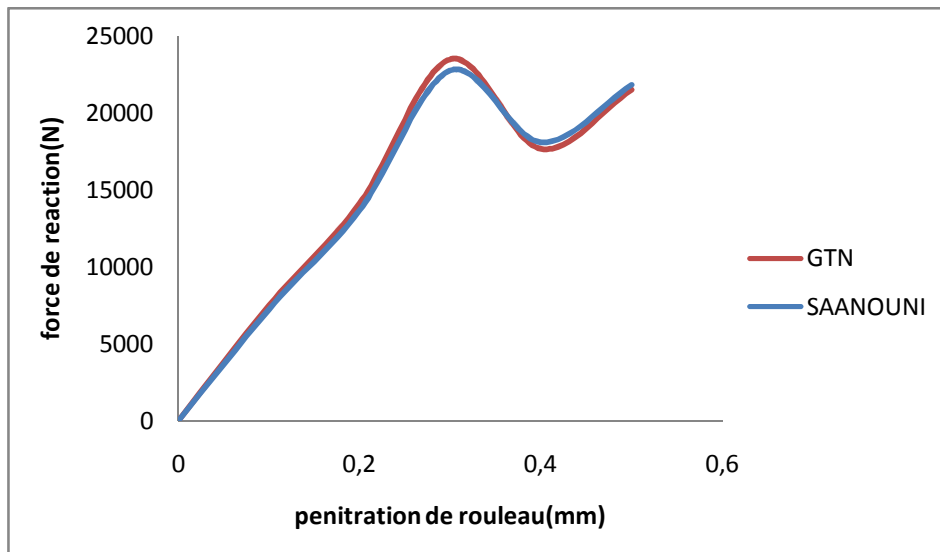


Figure IV.17 : L'influence de pénétration de rouleau sur les forces de réaction

Conclusion

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

Le procédé de mise en forme qu'on a étudié dans ce travail est le laminage qui permet de réduire l'épaisseur d'une tôle ou d'un produit par passage entre deux cylindres.

L'objectif de ce travail est de développer un outil permettant de la mise au point d'une méthode numérique pour étudier le procédé de mise en forme par Laminage.

Afin de construire un modèle en trois dimensions du procédé de Laminage, on a recours à la simulation numérique par Eléments Fini, et à l'utilisation de logiciel Abaqus.

On devait se conduire à l'optimisation des paramètres les plus importants pendant les opérations successives de Laminage, en vue de la réalisation optimale des pièces, pour la meilleure tenue en service possible.

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.

A la lumière de ce travail et des résultats mis en évidence, 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 laminage. Et que la simulation numérique sera un bon exemple d'aide à la décision au niveau des entreprises de fabrication de pièces.

En perspective de ce travail, une comparaison des résultats numériques a des résultats expérimentaux permettrons de mieux apprécie l'application des deux modèle a ce genres de matériau. Aussi étudier le modèle pour tenir compte des transformations de phases induite par l'opération serait envisageable.

Références bibliographiques :

[Bat 03] C. Bataille, Laminage des produits longs - Définitions et paramètres, Techniques de l'ingénieur, M7900, 2003.

[Mon 02] P. Montmitonnet, Laminage - Objectifs et modélisation-Techniques de l'Ingénieur, M3065 (2002).

[Fab00] P. Fabrègue, Métallurgie du laminage à chaud, Techniques de l'ingénieur. M7860, 2000.

[Far 89] J. Farhi, Coulée continue de l'acier. Généralités. Données physiques et métallurgiques, Techniques de l'ingénieur. M 7 810, 1989.

[Mon et Bri 09] F. Montheillet et L. Briottet, Endommagement et ductilité en mise en forme. Techniques de l'ingénieur, Vol M3 032, pp. 1-19, 1998.

[Bun et Esl 97] H. Bunge et C. Esling, Texture et anisotropie des matériaux, Techniques de l'Ingénieur, vol. M605, 1997.

[HAB01] Habraken, A.M., "*Endommagement ductile*" leçon publique, Liège 2001.

[Bel02] N.BELAMRI. Simulation numérique des procédés de découpe des aciers. Rapport d'avancement du contrat.UTT DCU n°146/1-2002.

[Kac58] KACHNOV L M. time of rupture process under creep condition. Vol 8 pages 26-31. 1958.

[Cha77] J. L. CHABOCHE. Description thermodynamique et phénoménologique de la viscoplasticité cyclique avec endommagement. Thèse doctorat Es-science, Paris VI, 1977.

[Cha78] J. L. CHABOCHE. L'utilisation des variables d'états interne pour la description du comportement viscoplastique et de la rupture par endommagement. Symp Franco-Polonais de rhéologie et mécanique. Cracovie 1978.

[Lem85] J.LEMAITRE et J-L CHABCHE. Mécanique des matériaux solides. Dunod 1985.

[Saa94] SAANOUNI K , FROSTER C and HATIRIA F B. on the an elastic flow with damage. International Damage Mechanics, vol 3 pages 140-169.

[Cor82] CORDEDOIS J P and SIDOROFF F. damage induced elastic anisotropy. Eudomech 115, Villard de Lens 1982.

[Gur77] GURSON A L: continuum theory of ductile rupture by void nucleation and Growth. Part I- Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media. J Eng. Mat Vol 99.1977.

[Tve81] TVERGAARD.V Influence of voids on shear bands instabilities under plane strain condition. Int.J.Facture 17:389-407.1981.

[Tn84] V.TVERGAARD and A. NEEDLEMAN. Analysis of the cup-cone fracture in around tensile bar. Acta Metallurgic, 32:157-169; 1984.

[Fel00] FELDER E. Procédés de mise en forme. Introduction. Technique de l'ingénieur, M 3000.

[Mai91] A. MAILLARD. Etude expérimentale et théorique du découpage. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 1991

Le logiciel de simulation ABAQUS :

Introduction

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 des problèmes non-linéaires.

Il a été développé par Hibbit, Karlsson et Sorensen [Hks98]. 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.

II. Présentation générale d'ABAQUS :

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

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

ABAQUS effectue la résolution d'un problème, décrit par un fichier « entrée » (ou fichier de données), il écrit la solution vers un fichier « de sortie » (ou fichier de résultats):

- ü Le fichier (« texte ») de données a pour extension (.inp), et dont le contenu des mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites,...
- ü Le fichier de résultats a pour extension (.odb), et dont le contenu des contours et des courbes montrant les résultats.
- ü Les autres fichiers créés pendant le calcul dans Abaqus sont :

Le Fichier (.dat) qui contient :

- ü Le fichier résumé de notre modélisation,
- ü Les messages d'erreur concernant notre modélisation,
- ü Les temps de calcul.

Le fichier (.msg) qui contient :

- v Le fichier résumé du calcul en cours,
- v Les messages d'erreur lors du déroulement du calcul.

La figure suivante, illustre un schéma de résolution d'un problème sur ABAQUS :

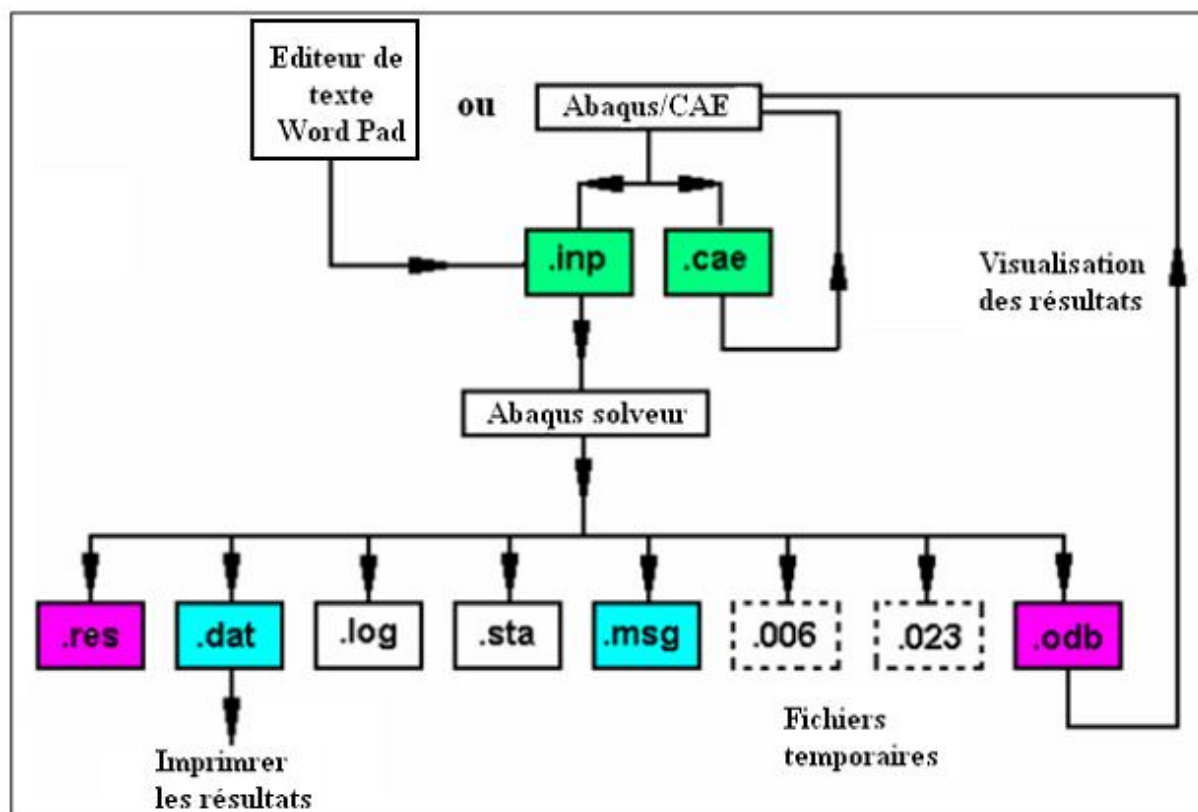


Figure IV.1 schémas de résolution dans ABAQUS.

III. Les principaux modules :

ABAQUS CAE, est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation. Ses modules sont :

v Le module « PART ».

Le module Part, permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un autre logiciel de dessin.

v Le module « PROPERTY ».

Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

v Le module « ASSEMBLY ».

Ce module, permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère, de coordonnées globales. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

v Le module « STEP ».

Ce module, permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

v Le module « INTERACTION ».

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS, ne prend en compte que les interactions explicitement définies.

v Le module « LOAD ».

Le module Load, permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

v Le module « MESH ».

Ce module, contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

▼ Le module « JOB ».

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires, et en tirer des résultats.

▼ Le module « VISUALIZATION ».

Ce module, permet de visualiser les résultats, les courbes de charges, les déformations...

▼ Le module « SKETCH ».

Ce module, permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

ABAQUS, se compose aussi d'autres modules qui sont :

▼ Les modules de ABAQUS /CAE (Computer Aided Engineering), qui est un environnement interactif permettant :

ü La création du modèle E.F,

ü Le lancement de calcul,

ü Le diagnostic d'éléments,

ü La visualisation des résultats.

▼ Les modules ABAQUS /Standard et ABAQUS /Explicit : sont des solveurs qui font les calculs.

▼ Le module ABAQUS/Standard (faisant une résolution implicite) qui permet en premier lieu les :

Analyses linéaires ou non-linéaires, telles que :

- l'analyse statique ou dynamique en contraintes et déplacements,
- la réponse viscoélastique ou viscoplastique,
- l'analyse de transfert thermique (transitoire et stationnaire),
- l'analyse de diffusion de masse (transitoire et stationnaire),
- l'analyse acoustique.

Les problèmes couplés :

- Thermo- mécanique avec couplage réciproque,

- Thermo- électrique,
- Piézo-électrique,
- Mécanique des milieux poreux saturés et non-saturés, couplage avec l'écoulement thermomécanique avec diffusion de masse,
- Couplage mécanique/acoustique.

En deuxième lieu les analyses linéaires de perturbations, telle que :

- Analyse statique ou dynamique en contraintes et déplacements (modes propres, flambage,...).
- ▼ Le module ABAQUS/Explicit (faisant une résolution explicite) qui permet :
- l'analyse dynamique en contraintes et déplacements.
- ▼ Le module ABAQUS /Viewer qui permet la visualisation des résultats.

IV. Les algorithmes de résolution:

ABAQUS, utilise des algorithmes de résolution qui traitent les différents problèmes :

- ü le problème linéaire : solution obtenue directement,
- ü le problème non-linéaire en régime permanent : solution obtenue avec itération (avec contrôle de la précision),
- ü le problème non-linéaire en régime transitoire : solution obtenue avec itération (avec contrôle de la précision) et incrémentation (avec contrôle du pas de temps), utilise le schéma d'intégration implicite de Hilbert-Hughes-Taylor,
- ü des techniques de résolution,
- ü des non linéarités géométriques,
- ü la formulation de Lagrange et de Lagrange actualisées (problème d'élasticité ou d'élastoplasticité),
- ü la résolution d'équations non-linéaires,
- ü la méthode de Newton complète (qui consiste la reconstruction de la matrice de rigidité pour chaque itération),
- ü l'accélérateur de convergence pour des discontinuités sévères,
- ü le contrôle de la solution,
- ü le contrôle en forces, déplacements et températures pour chaque pas de temps,

ü le critère sur les résidus (minimum) associés à chaque type d'équations.

V. Conclusion :

A travers cette annexe, on peut avoir une idée générale sur le fonctionnement du code de calcul par éléments finis ABAQUS. La deuxième annexe fera l'objet d'une présentation d'un essai de laminage en 2D.

Introduction :

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

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

1. éprouvette: Corps déformable.
2. le rouleau : 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 :

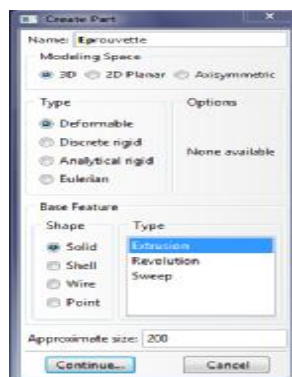
Dans ABAQUS, pour créer un objet 3D, il est nécessaire de créer tout d'abord le profil de l'objet. Ensuite ce profil générera l'objet en 3D par extrusion, révolution ou balayage (on crée un profil puis un chemin sur lequel propager ce profil).

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

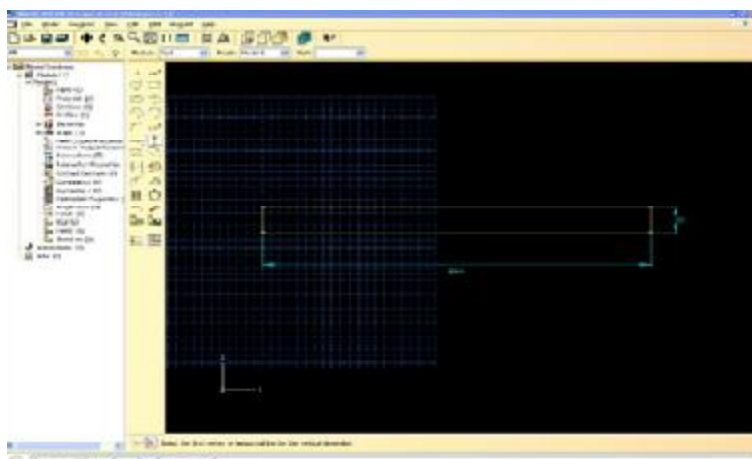
cliquant sur )

Ø Pour l'éprouvette :

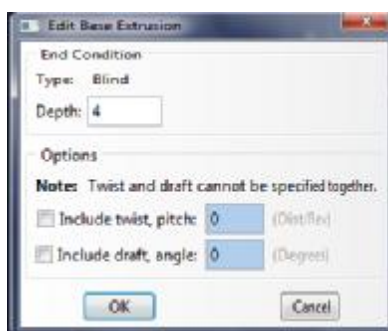
Cliquez sur **Part>create**, et comme **Type** sélectionnez **deformable**, comme suit :



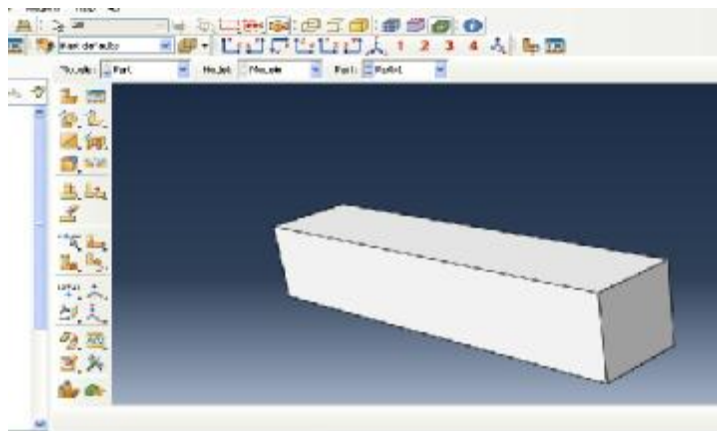
Cliquez sur **Continue** pour dessiner l'éprouvette :



Lorsque le profil est bon, appuyez sur **Done** pour faire apparaître la boîte de dialogue **Edit Base Extrusion**, qui permet de donner les caractéristiques de l'extrusion. Dans le champ **Depth** (profondeur) entrez 2.



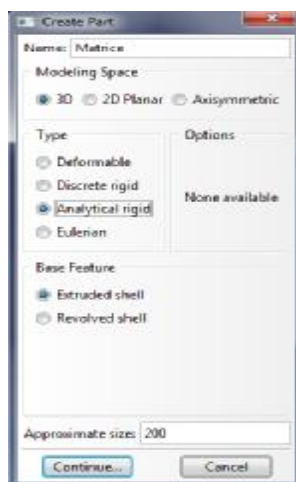
En suit cliquez sur **OK**, pour avoir la forme finale comme suit :



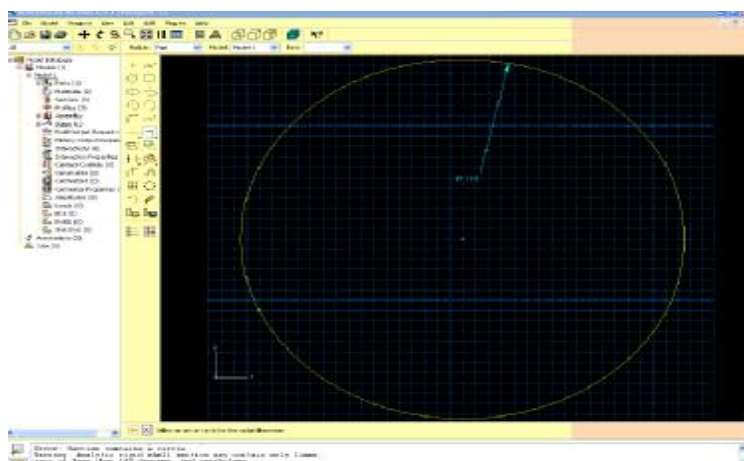
On passe maintenant à créer les corps rigides :

1. Le rouleau :

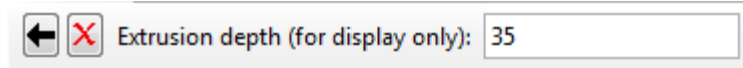
Cliquez sur **Part>create** comme l'étape précédente, et comme **Type** sélectionnez **Analytical rigid**, comme suit :



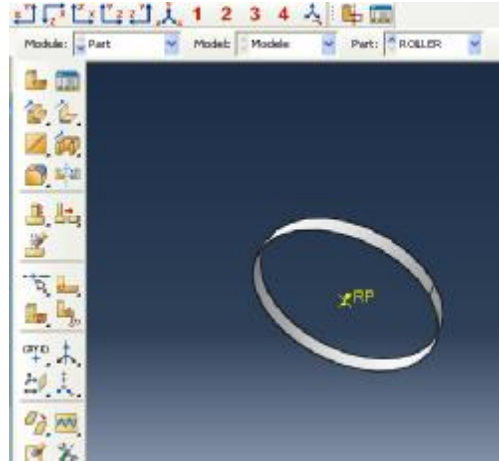
Appuyez sur **Continue** pour dessiner le rouleau comme suit :



Cliquez sur **Done** puis entrer la valeur 35 dans la fenêtre suivante, qui apparaît au dessous de l'interface :



Cliquez sur bouton **M2** de la souris, pour avoir la forme finale :

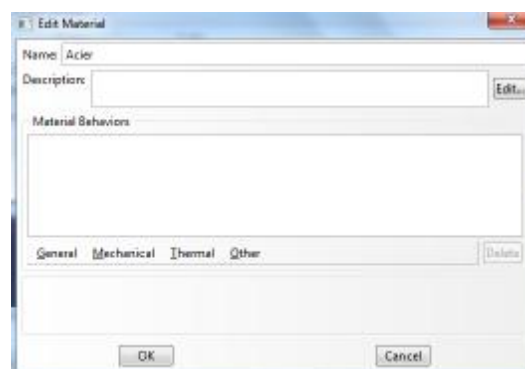


Lorsque nous créons une surface rigide, il est nécessaire de créer un point de référence, sur lequel seront appliqués tous les chargements qu'on veut créer. Nous allons choisir le point de référence : Allez dans **Tools > Reference Point** et sélectionnez le point pour l'objet rigide.

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 acier.

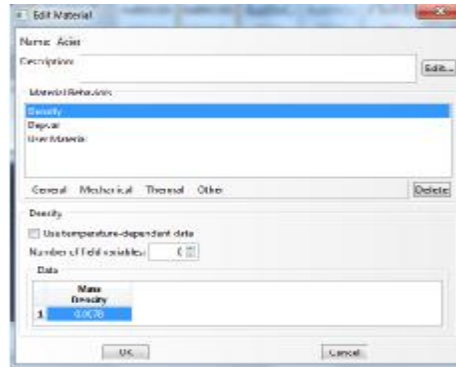
1. Double cliques sur **Materials**, pour ouvrir **Edit Material**. Nommez le matériau **Acier**.



2. 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 :

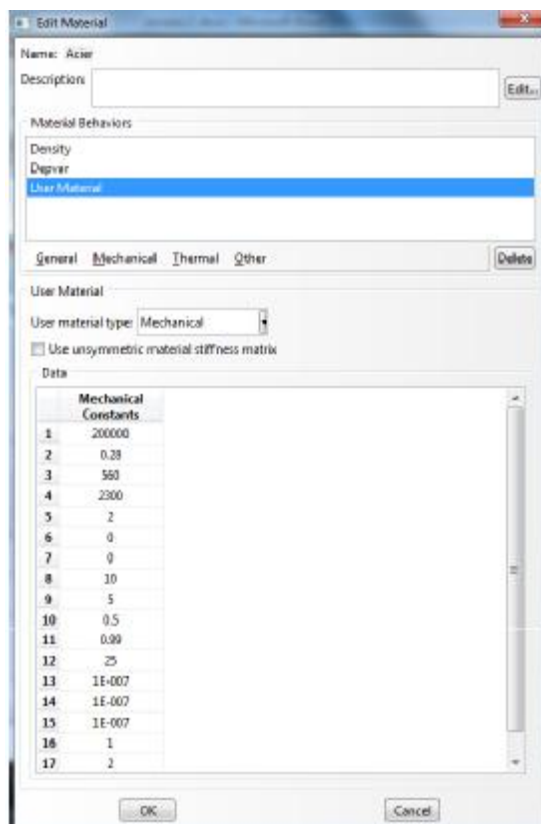
ü **Density**, puis entrez sa valeur :



ü **Depvar**, puis entrez sa valeur comme suit :



ü **User Matériau** :



Cliquez sur **OK** pour valider votre matériau.

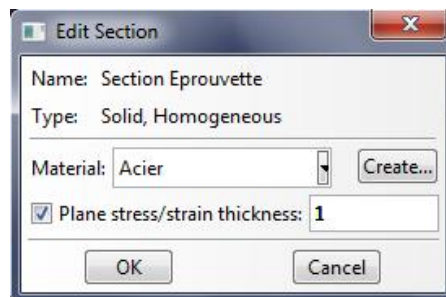
La signification de ces paramètres est présentée par le tableau suivant, dans le cas où on travaille à l'aide d'une **VUMAT** qui prend en charge les caractéristiques ci-dessous :

N°	Paramètres	noms	Valeurs et unités
1	E	Module de Young	200 000 MPa
2	ν	Coefficient de poisson	0,30
3	σ	La contrainte limite d'élasticité	390MPa
4	Q	Module d'écroutissage isotrope	2600MPa
5	b	Coefficient d'écroutissage isotrope non linéaire	3MPa
6	c	Module d'écroutissage cinématique	0
7	a	Coefficient d'écroutissage cinématique non linéaire	0
8	S	Paramètre de dommage	35MPa
9	s	Paramètre de dommage	50
10	β	Paramètre de dommage	1.2
11	D_c	La valeur critique de la variable du dommage	0,99
12	Y_0	Paramètre de dommage	60
13	EPSF	Paramètre de précision	1E-007
14	EPSC	Paramètre de précision	1E-007
15	EPSC	Paramètre de précision	1E-007
16	NCD	Indicateur de couplage à l'endommagement	1 ou 2
17	NPLAN	Indicateur de problème de contrainte plane	2
18	NPN		2

III. Définir et affecter les propriétés de section :

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

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



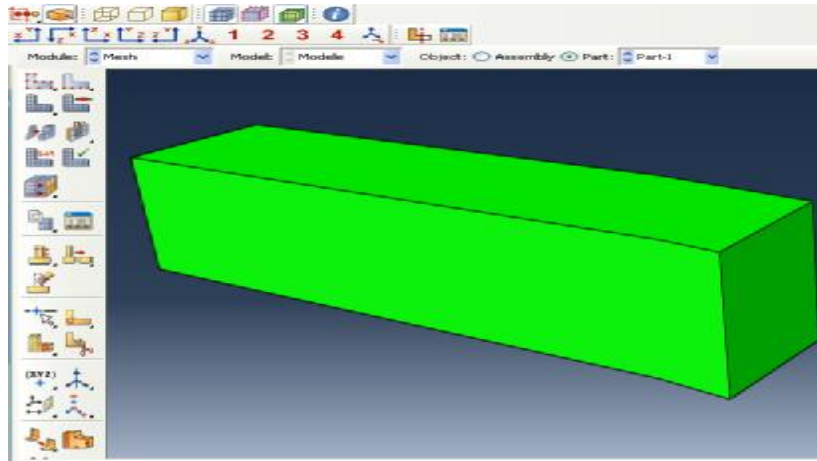
4. Ensuite, il faut affecter la section à notre éprouvette. Pour cela, dans l'arbre ouvrez l'arborescence du **Part** en cliquant sur « + » puis celle de l'Eprouvette. Double-cliques sur **Section Assignment**. Des instructions sont alors données dans la bande de dialogue. Sélectionnez l'éprouvette en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

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

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



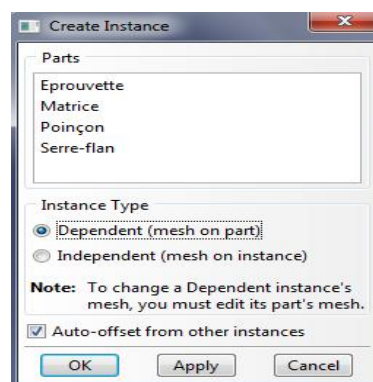
Lorsque vous avez affecté une section à un objet, ABAQUS colorie l'objet en vert pour signifier qu'il est défini. De plus, le matériau défini dans la section est affecté à l'objet.



IV. Assembler le modèle :

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

1. Tout d'abord il nous faut créer nos instances. Double cliques sur **Instances** dans l'arborescence **Assembly**. Sélectionnez **Eprouvette** puis **Apply**. La nouvelle instance se nomme Eprouvette 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 l'instance de rouleau.



Une fois que les instances sont créées, il est judicieux de les placer correctement pour faciliter la visualisation de l'ensemble. Pour cela il est nécessaire de savoir qu'ABAQUS possède les outils de translation et de rotation des pièces, des outils qui permettent de positionner une instance mobiles par rapport à une instance fixe (ces instances seront choisies lors de l'utilisation des outils), ces outils sont disponibles dans **Constraints** qui contient :

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

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

Parallel Edge : Arrêtes parallèles.

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

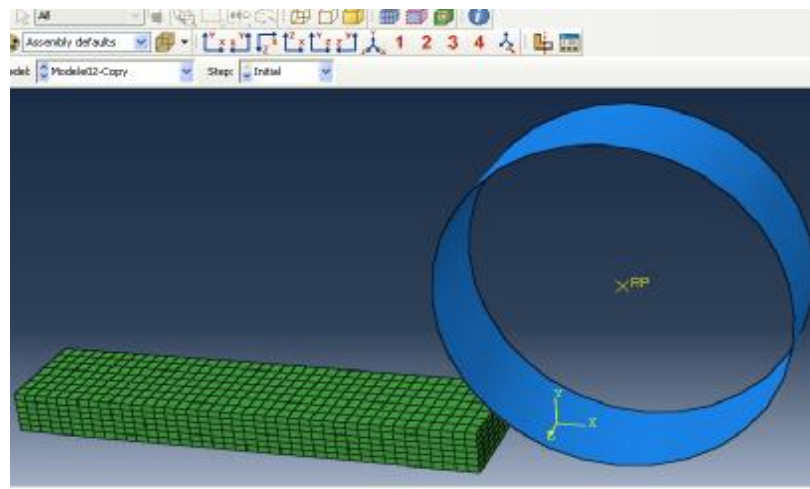
Coaxial : L'instance mobile bouge jusqu'à ce que les deux faces choisies soient coaxiales.

Coincident Point : 2 points coïncidents.

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

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

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

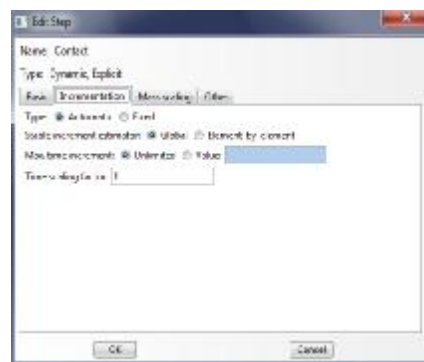


V. Définir les pas d'analyse

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

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

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



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

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

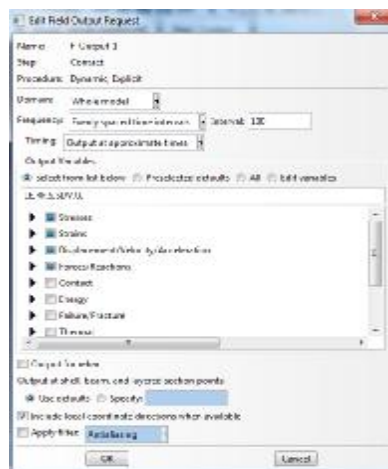
- CDISP (Contact Displacements)

Maintenant nous voulons modifier ces variables :

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



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



VI. Définition des interactions :

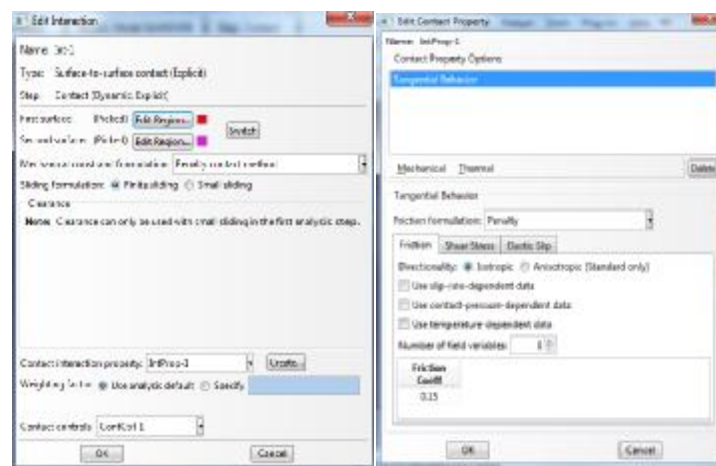
Dans le module **Interaction**, allez dans le menu **Interaction** > **Créate** et créer une condition de contact **surface to surface** entre l'éprouvette et le rouleau



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

Remarque :

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



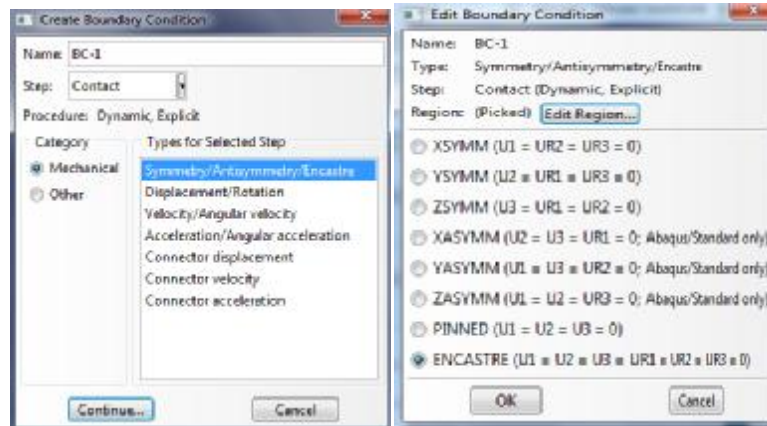
VII. Appliquer des conditions limites et les chargements

Nous allons créer trois conditions :

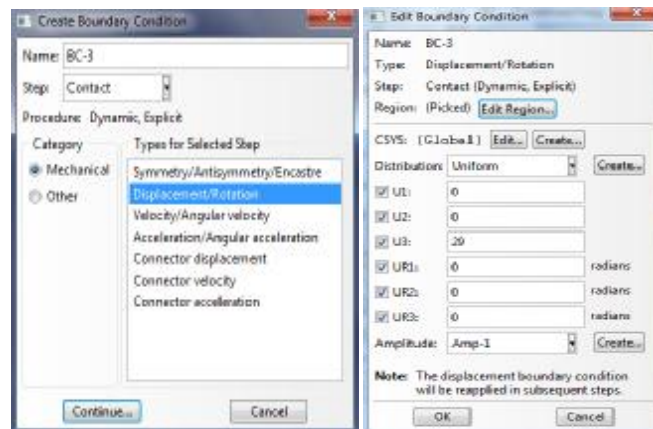
1. Dans l'arbre, faites **M3** sur **BCs** et sélectionnez **Manager**. Créez une nouvelle condition limite. Nommez la **Fixe1**.
2. Sélectionnez comme type **Symmetry/Antisymmetry/Encastre** de condition limite. **Continue**. Sélectionnez le point de référence de rouleau. Cliquez sur **Done**.

La fenêtre **Edit Boundary Condition** s'ouvre. Cochez **Encastre**.

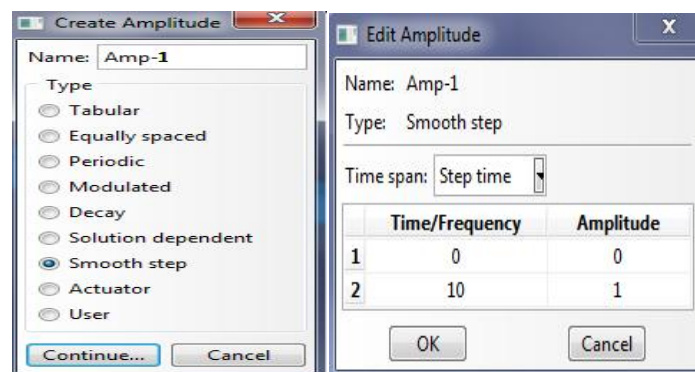
Faites de même pour le serre-flan.



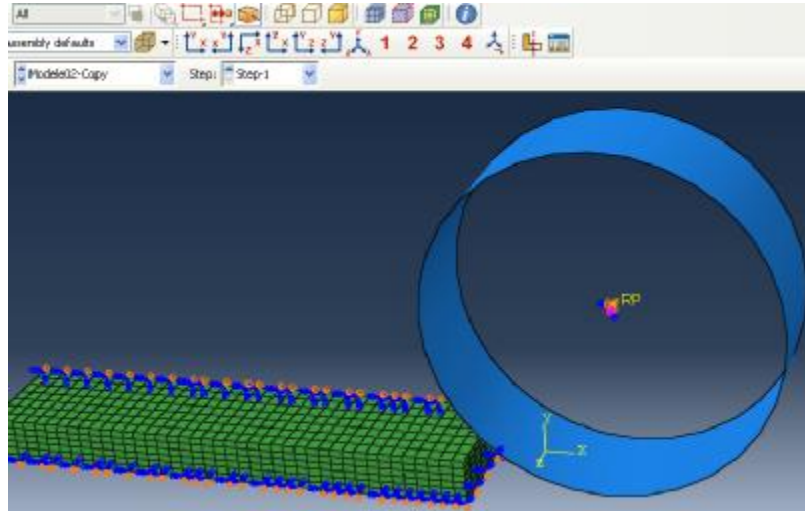
3. pour la troisième condition répétez l'étape 1, et pour l'étape2 sélectionnez comme type **Displacement/rotation** acceptez la distribution **Uniform**, puis faites entrer les valeurs comme suit :



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



Les conditions aux limites créées sont comme suit:



VIII. Maillage:

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

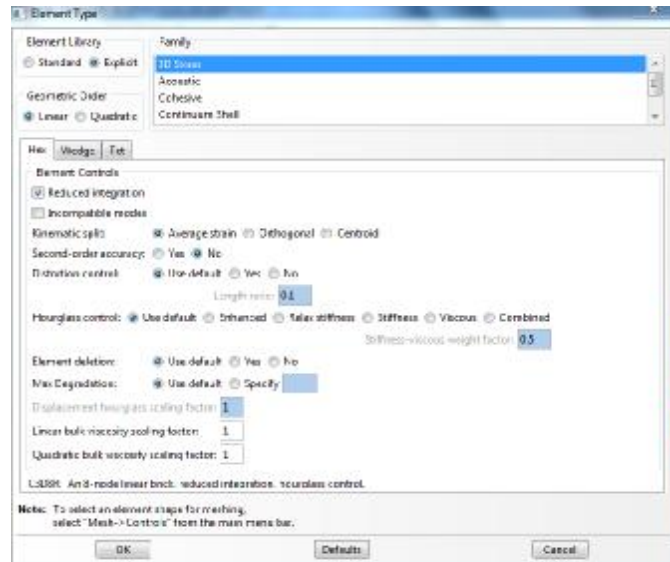
1. Dans le modèle sous **Parts**, éprouvette, double cliques sur **Mesh** pour atteindre le module de maillage. Dans la barre de menu, allez dans **Mesh>Controls**, sélectionnez l'éprouvette, cliquez sur **Done**. La fenêtre **Mesh Controls** apparait cochez **Hex**. Les couleurs permettent de voir quelle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



Cliquez sur **OK**.

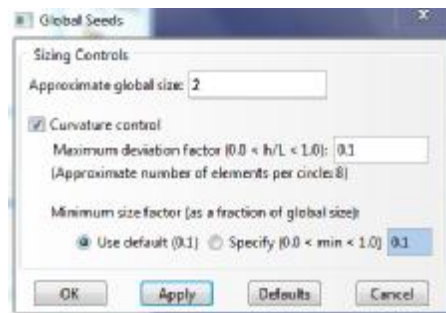
Allez dans **Mesh>Element Type**, sélectionnez l'éprouvette, cliquez sur **Done**.

La fenêtre **Element Type** apparait. Dans **Element Library** sélectionnez **Explicit**. Pour **Geometric Order** cochez **linear**.



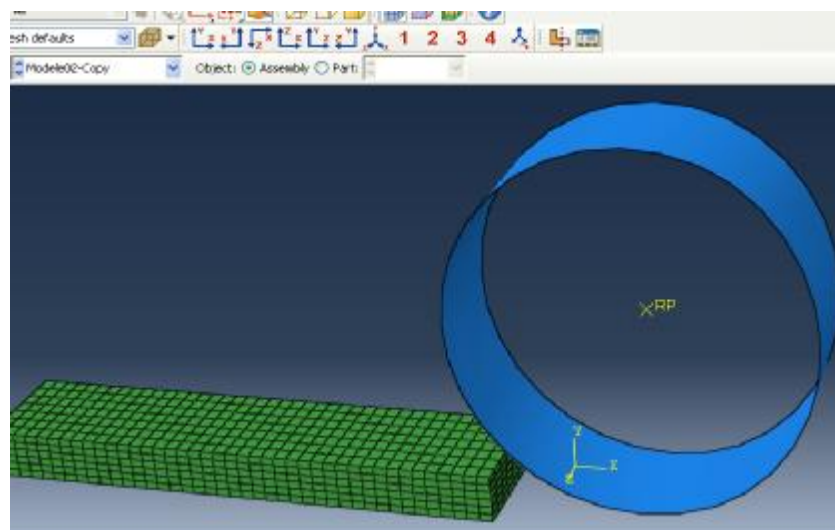
Cliquez sur **OK**.

Allez dans **Seed>Instance**, sélectionnez l'éprouvette, cliquez sur **Done**. La fenêtre **Global Seeds** apparaît. Dans **Approximate Global Size** entrez la valeur 2.



Cliquez sur **OK**.

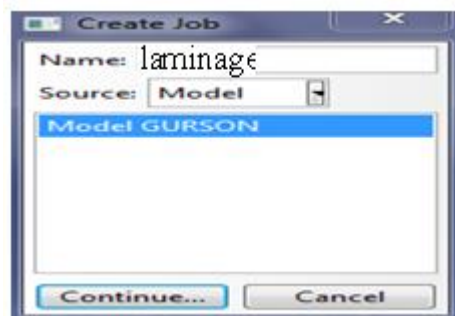
Allez dans **Mesh>Instance**, sélectionnez l'éprouvette, cliquez sur **Done**. ABAQUS maille l'éprouvette de la façon suivante :



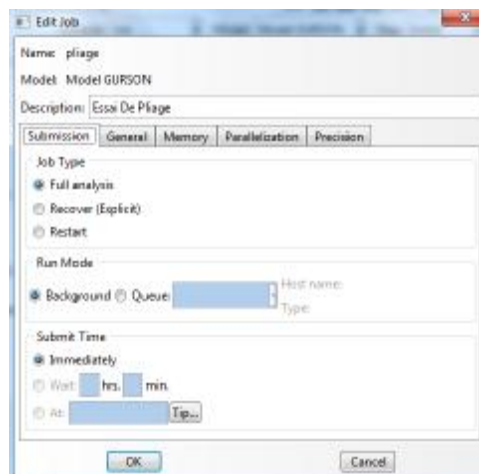
XIII. Créer et soumettre un travail d'analyse

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 laminage.



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



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.

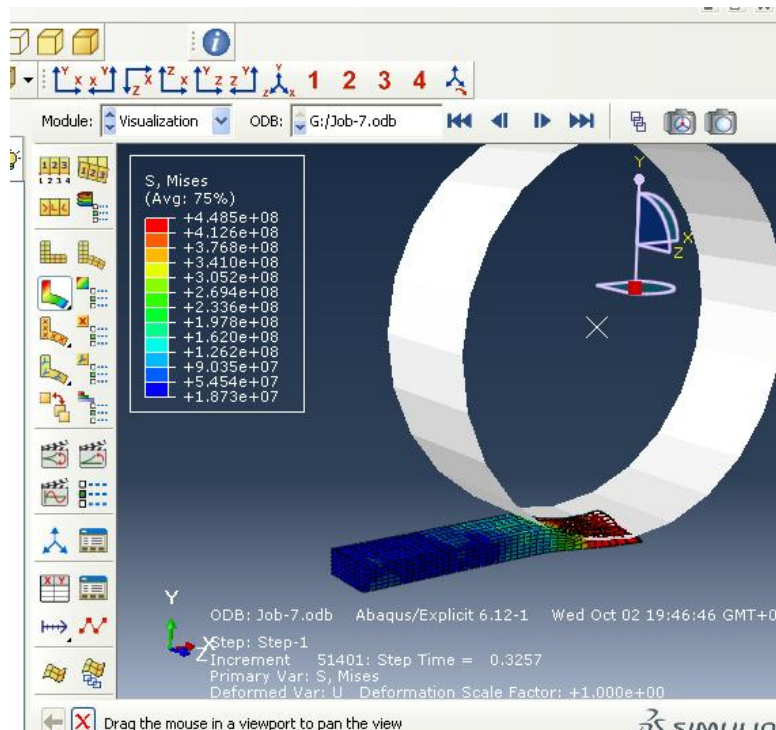
Continue Analysis : Continuer le modèle après une vérification.

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.