

### Critères de plasticité

L'étude du comportement plastique nous a montré dans l'essai de traction, que le seuil de plasticité était atteint lorsque la contrainte exercée ( $\sigma$ ) était égale à la contrainte d'écoulement ( $\sigma_0$ ).

En généralisant au cas tridimensionnel, on obtient une relation qui caractérise le critère de plasticité.

Le critère est représenté géométriquement par une surface dans l'espace ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) qui caractérise la frontière d'écoulement.

#### ➤ Le critère de Von Mises

Il est défini de la manière suivante :

- Axes quelconques

$$\sigma_{\text{eq}}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]$$

- Axes principaux

$$\sigma_{\text{eq}}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2]$$

Cette équation est représentée dans le repère ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) par un cylindre de révolution d'axes (1 1 1) Figure A 4.1.

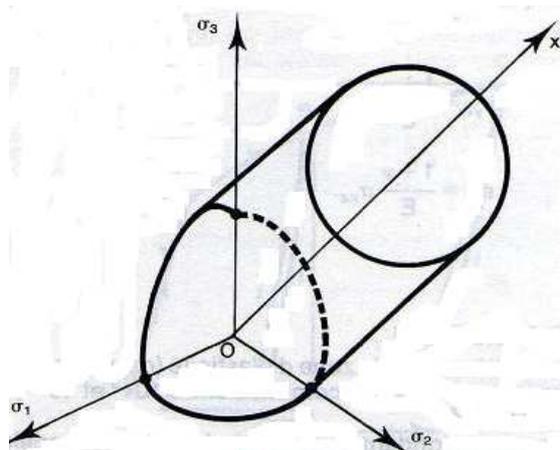


Figure A 4.1 VON MISES cas général

La frontière d'écoulement est un cylindre de révolution d'axe (1, 1,1) dans le repère  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ .

➤ Expression simplifiées du critère de Von mises

- En contraintes planes :  $\sigma_3 = 0$

L'expression se réduit à

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2) = \sigma_0^2$$

Qui est l'équation d'une ellipse à 45° (Figure A 4.2)

Cette ellipse est l'intersection du cylindre de section circulaire avec le plan  $\sigma_3 = 0$

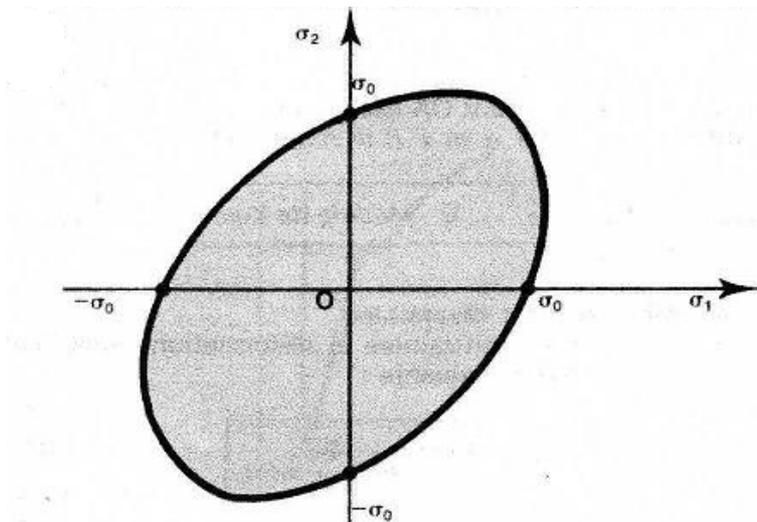


Figure A.4.2 VON MISES : contrainte planes

La frontière d'écoulement est une ellipse dont les axes sont inclinés à 45° par rapport à  $O\sigma_1, \sigma_2$ .

- En déformation planes :

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

L'expression se réduit alors à

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = \frac{4\sigma_0^2}{3}$$

Qui est l'équation de deux droites parallèles (figure A.4.3)

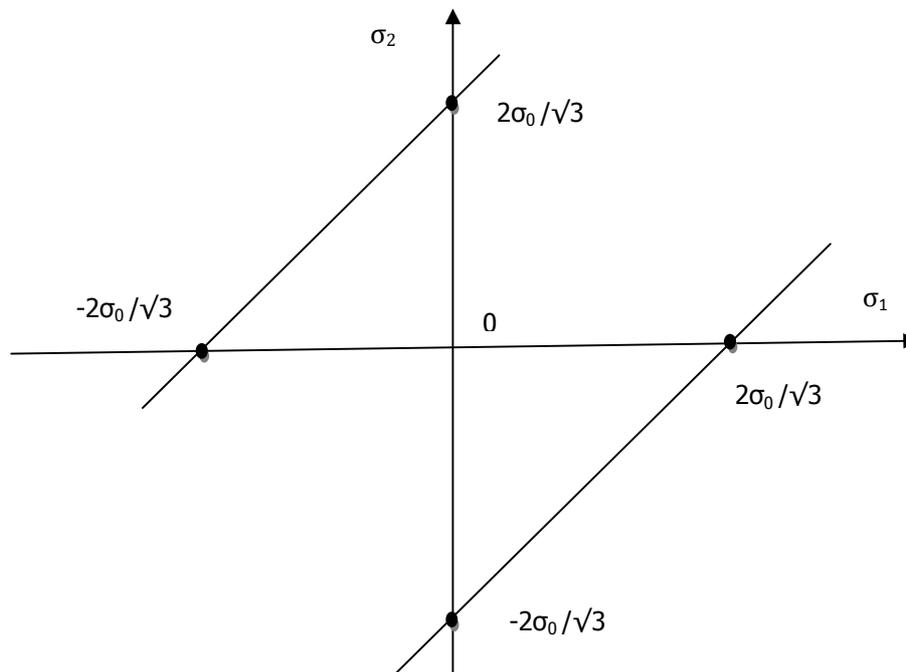


Figure A.4.3 VON MISES : déformations planes

La frontière d'écoulement est caractérisée par deux droites parallèles inclinées à 45° par rapport à O  $\sigma_1 \sigma_2$ .

Rappelons toute fois que ce critère implique :

- que l'effet Bauschinger est négligé
- que le matériau est isotrope
- que la pression hydrostatique n'intervient pas

Souvent utilisé, il se limite toutefois aux matériaux isotropes.

➤ Le critère de Hill

Le critère de Hill est donné par l'expression :

- Axes quelconques

$$\sigma_{\text{éq}}^2 = \frac{1}{2} [H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + G(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (2N\sigma_{12}^2 + 2L\sigma_{13}^2 + 2M\sigma_{23}^2)]$$

● Axes principaux

$$\sigma_{\text{eq}}^2 = \frac{1}{2} [ H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + G(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 ]$$

(où F, G, H, L, M et N sont les « coefficients de Hill »)

Ce critère est une généralisation du critère de Von Mises, du fait de ses coefficients qui prennent en compte l'anisotropie du matériau.

➤ Critère de Trésca

Il est basé sur le fait que la plastification se produit lorsque la différence extrême atteint la valeur de la contrainte d'écoulement ( $\sigma_0$ ).

Expression en fonction des contraintes principales :

Si l'on admet que :

$$(\sigma_1 > \sigma_0 > \sigma_3)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0)$$

Cette équation est représenté, dans le repère ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) par un prisme droit hexagonale régulier dont les arrêtes sont parallèle à l'axe (1,1) (figure A4.4) .

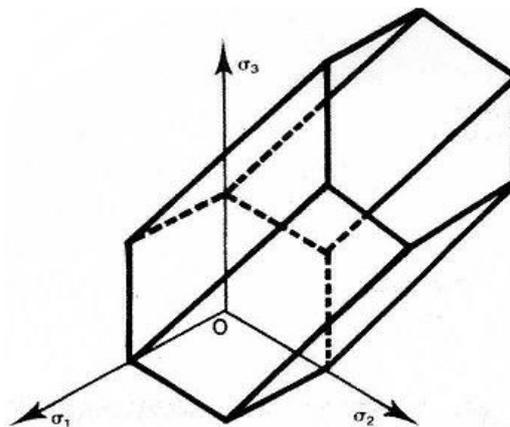


Figure A4.4 TRESCA : cas générale

La surface caractérisant la frontière d'écoulement est un prisme droit à section hexagonale dont les arêtes sont parallèles à l'axe (1, 1, 1).

A noter que ce prisme est inscrit dans le cylindre de Von Mises.

- Expression en contraintes planes:  $\sigma_3=0$

La frontière d'écoulement est l'intersection du prisme défini ci-dessus avec le plan  $\sigma_3=0$  figure A4.5

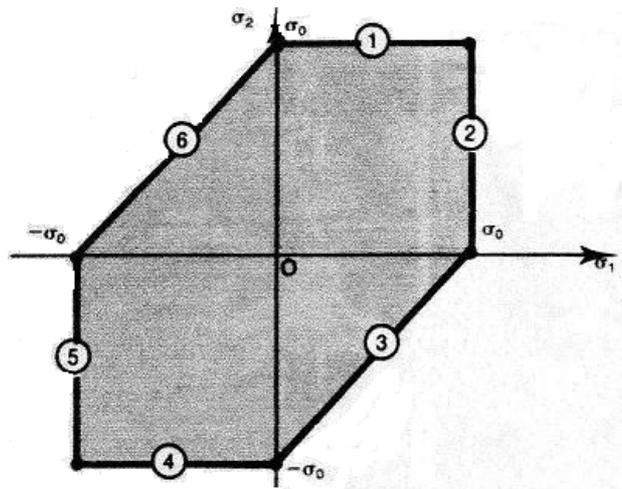


Figure A4.5 TRESCA : Contraintes planes

- Expression en déformations planes :

$$(\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0)$$

Cette équation est représentée par deux droites parallèles orientées à  $45^\circ$  par rapport aux axes  $(O \sigma_1, \sigma_2)$  figure A4.6

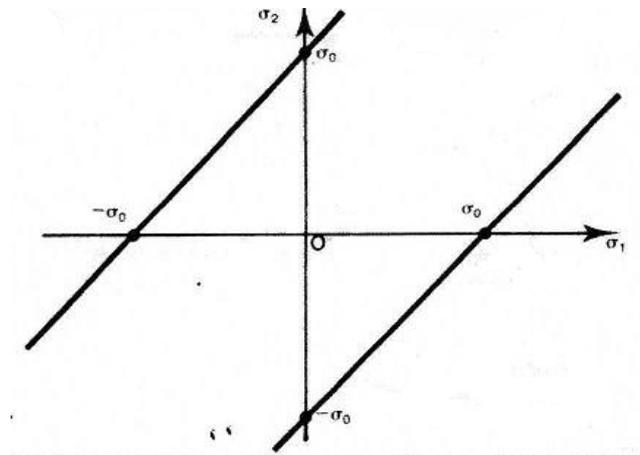


Figure A4.6 TRESCA : déformations planes

Dans l'état de déformations planes, la frontière d'écoulement est caractérisée par deux droites parallèles inclinées à  $45^\circ$  par rapport à  $O \sigma_1 \sigma_2$ .

### A 5. Méthodes de calcul en plasticité

Les problèmes qui se posent en procédé de formage rendent primordiaux les aspects suivants :

**Puissance dissipée** lors de l'écoulement de la matière, bien entendu ce dernier est conditionné par la gamme de fabrication.

**Forme du produit** on distingue deux cas :

- L'outillage enveloppe complètement le produit en fin de l'opération (estampage) ou bien, le contraint à une réduction de section (filage, laminage).

Dans ce cas, la prévision de défauts, due à des contraintes élevées, est un aspect intéressant.

- L'outillage agit seulement sur une partie de la surface du produit (forgeage libre, repoussage, fluotournage).

Les approches : on distingue deux types d'approches :

- **Approche théorique**

Méthode de l'énergie de déformation uniforme.

Méthode de tranche.

Méthode d'encadrement.

Le choix entre les méthodes dépend naturellement de la nature du problème.

- **Approche expérimentale**

Simulation.

Les approches théoriques

#### **Méthode de l'énergie de déformation uniforme :**

Cette méthode donne très rapidement un ordre de grandeur de la **puissance** et des **efforts** mis en jeu dans un procédé.

Principe

Un élément de matière soumis à un état de contrainte  $[\sigma]$  et à une déformation  $[d\epsilon]$  met en jeu une énergie :

$$dW_u = \sum \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

Remarque: 1

- La relation précédente est le travail des forces intérieures, ou travail de déformation par unité de volume.

- La partie élastique est négligeable dans les procédés de mise en forme ; donc le travail de déformation c'est l'énergie dissipée.
- La déformation  $[d\epsilon]$  s'effectue sans changement de volume.
- La composante hydrostatique du tenseur des contraintes (pression) ne travaille donc pas:

$$dW_u = \sum s_{ij} d\epsilon_{ij} = [s] \cdot [d\epsilon] = \sigma_0 d\bar{\epsilon}$$

Conclusion : L'énergie dissipée par unité de volume est le produit de la contrainte d'écoulement par l'incrément de la déformation généralisée.

#### Remarque 2

Quand la déformation est décrite par un champ de vitesse, on remplace la notion d'énergie dissipée par celle de la puissance dissipée.

$$\dot{W}_u = \sigma_0 \dot{\bar{\epsilon}}$$

En expression globale devient :

La puissance dissipée dans la déformation plastique d'un volume (v) de matière :

$$\dot{W}_i = \sigma_0 \dot{\bar{\epsilon}} v$$

Sachant que la puissance motrice :  $\dot{W}_e = F u$

La force motrice  $F$  se déduit en faisant le bilan des puissances :

$$\dot{W}_i = \dot{W}_e$$

En général  $\sigma_0$  et  $\dot{\bar{\epsilon}}$  varient d'un point à l'autre. La méthode de l'énergie de déformation uniforme revient à prendre des *valeurs moyennes* pour ces deux quantités

Choix d'une vitesse de déformation moyenne

En fait le choix d'une vitesse de déformation moyenne équivaut à une *simplification de l'état des contraintes* dans la zone déformée.

#### ➤ Généralisation de la méthode

La méthode se résume en *deux simplifications* et une *formule* : pour tout le volume déformé plastiquement on choisit :

- 1) Une vitesse de déformation uniforme (moyenne)
- 2) Une valeur uniforme de la contrainte d'écoulement

La puissance nécessaire à l'opération s'écrit alors :

$$\dot{W}_i = \sigma_0 \dot{\bar{\epsilon}} v$$

La puissance motrice :

$$\dot{W}_e = F \dot{u}$$

La force motrice  $F$  se déduit en faisant le bilan des puissances :

$$\dot{W}_i = \dot{W}_e$$

Remarque :

La méthode de l'énergie uniforme fournit un résultat inférieur à la réalité du fait que l'on néglige le frottement.

- **Méthode des tranches**

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

Principe :

La matière est décomposée en tranche d'épaisseur infinitésimale perpendiculaire à la direction Ox. On fait le bilan des forces appliquées à chacune des tranches.

Les équations de la plasticité permettent d'écrire une équation différentielle.

La méthode est applicable moyennant les hypothèses suivantes :

- La direction principale de contrainte est conservée pendant toute l'opération.
- La déformation est homogène.
- Le frottement se traduit par une cisssion à l'interface outil / pièce.
- La contrainte est fonction de l'abscisse.

Généralisation

Nous allons dégager les traits généraux de la méthode, pour pouvoir l'appliquer à d'autres procédés.

Hypothèses

On découpe par la pensée le matériau en tranches respectant la symétrie du problème. Ces tranches peuvent être des parallélépipèdes, des disques, des anneaux, etc. elles sont infiniment minces selon une direction.

Des exemples de découpage des tranches sont montrés sur la figure A5.1, A5.2.

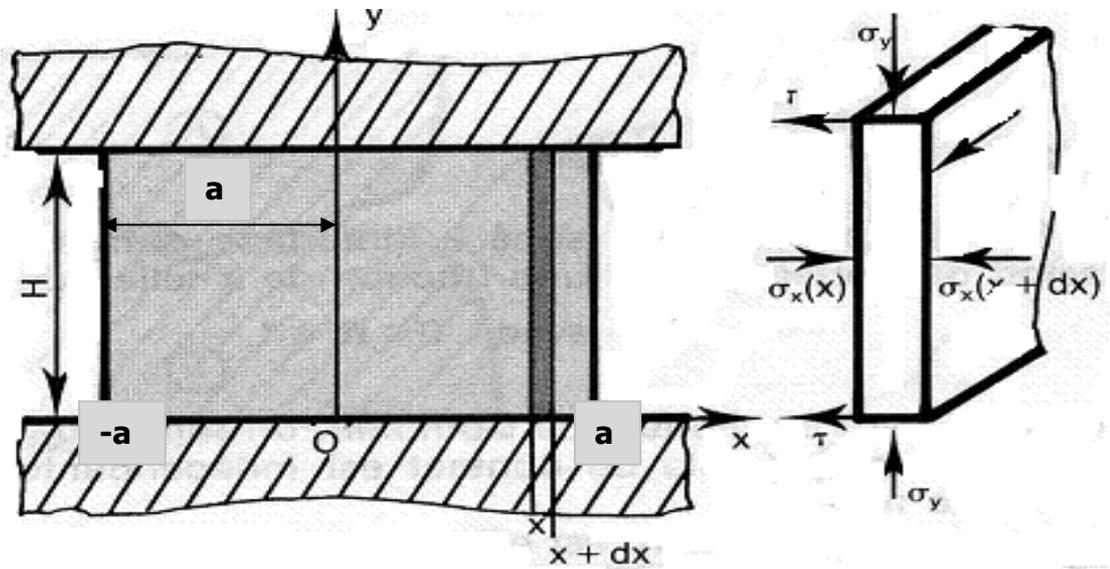


Figure A5.1. Représentation d'une tranche

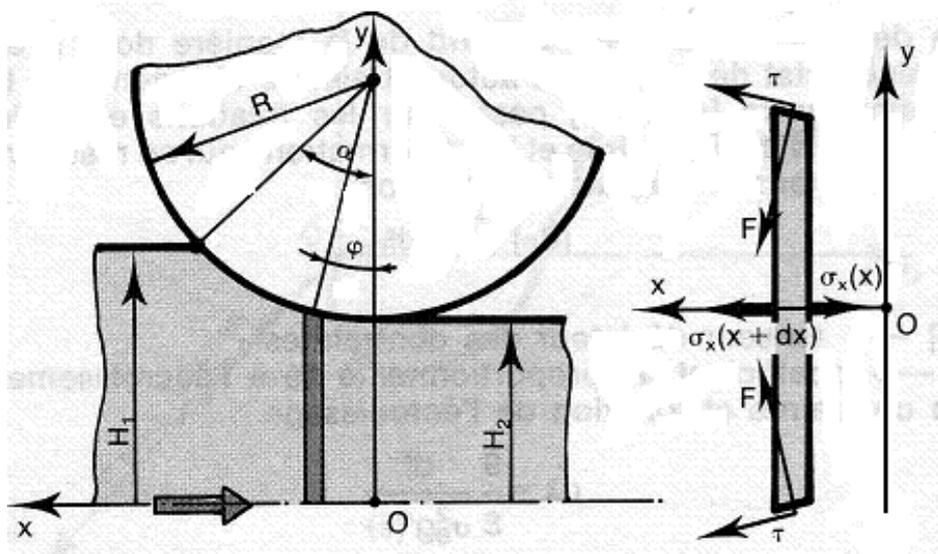


Figure A5.2. Méthode de tranche pour le procédé du laminage

On suppose alors que:

Les contraintes principales sont constantes dans une tranche (c'est -à-dire ne dépendent que de x).

Les forces appliquées à la tranche résultent d'une part de ces contraintes, d'autre part d'une cission créée par le frottement de l'outil à la surface de la tranche.

Exemple : Forgeage d'une barre (déformation plane)

Découpons la barre en tranches d'épaisseur dx selon l'axe ox figure A5.1

Supposons que :

Les axes principaux des contraintes sont dans toute la barre Ox, Oy, et Oz

Les contraintes principales ainsi définies et ne dépendent que de x, c'est -à-dire sont dans constantes dans une tranche infiniment mince

Le frottement d'outil se traduit par une cission sur les bords de la tranche, cette cission ne perturbe pas les contraintes dans la tranche

Examinons la moitié du lopin  $x > 0$  : les hypothèses sur les contraintes assurent l'équilibre selon Oy et Oz .

Ecrivons alors l'équilibre de la tranche comprise entre x et x+dx .elle est soumise selon Ox , aux forces suivantes

Sur la face x  $-h L \sigma_x(x)$

Sur la face x+dx  $+h L \sigma_x(x+dx)$

Sur chaque face horizontale  $- \tau L dx$

Au deuxième ordre près :  $\sigma_x(x+dx) = \sigma_x + \frac{d\sigma_x}{dx} dx$

L'équilibre s'écrit donc :  $-h L \sigma_x + h L (\sigma_x + \frac{d\sigma_x}{dx} dx) - 2 \tau L dx = 0$

$$\text{Soit : } \frac{d\sigma_x}{dx} = + \frac{2\tau}{h}$$

Prenons comme modèle du frottement un frottement de couche limite :

$$\tau = \bar{m} \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad 0 \leq \bar{m} \leq 1$$

L'équation d'équilibre devient :

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{\bar{m}}{h}$$

Qui s'intègre immédiatement en :

$$\sigma_x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{\bar{m}}{h} (x-a) + \sigma_x(a)$$

On pour  $x=a$ , nous avons une surface libre normale à Ox, donc :

$$\vec{T}_{Ox} = \vec{0} \Rightarrow \sigma_x(a) = 0$$

Qui nous donne une contrainte suivant Ox :  $\sigma_x = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \frac{\bar{m}}{h}(x-a)$

Remarque :  $\sigma_x$  est négative car  $(x \geq a)$ , c'est donc une contrainte de compression ; sous l'effet du frottement cette contrainte croit en valeur absolue depuis le bord libre jusqu'au centre .

Le critère de Von mises s'écrit en déformation plane  $\sigma_x - \sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0$

On remplace la valeur de  $\sigma_x$  on obtient :

$$\sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \left[ + \frac{\bar{m}}{h}(x-a) - 1 \right]$$

Elle croit en valeur absolue du bord vers le centre.

Or la contrainte maximale pour

$$(x=0) \Rightarrow \sigma_y^m = - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \left( \frac{\bar{m}a}{h} + 1 \right)$$

Effort de forgeage :  $\sigma_y(x) = \frac{p}{S} \Rightarrow p = \sigma_y(x).S$  dans élément de matière de surface

$$dS = L.dx \Rightarrow dp = \sigma_y(x).Ldx \Rightarrow p = -2L \int_0^a \sigma_y^m(x).dx$$

Enfin  $p = 2La \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{\bar{m}a}{2h} \right)$  et la pression moyenne :

$$P_M = \frac{p}{S} = \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \left( 1 + \frac{\bar{m}a}{2h} \right)$$

## Méthodes d'encadrement

Calculer un procédé de mise en forme, c'est d'abord **obtenir une valeur approchée des principales grandeurs technologiques** (couple de laminages, force de filage ou de poinçonnement, etc.)

Les méthodes d'encadrement conduisent à deux approximations l'une par excès (méthode de la borne supérieure), elles trouvent leur fondement dans deux théorèmes (Théorèmes d'extrémum : BI extrémum sur les contraintes et BS extrémum sur les vitesses, eux-mêmes déduite du théorème du **travail maximal**, l'autre par défaut (méthode de la borne inférieure)

### ➤ Méthode de la borne supérieure

- Exposé de la méthode

Elle comporte toujours les étapes suivant :

a) calcul de la puissance des forces motrices extérieures  $\dot{W}_e$

b) calcul approché de la puissance dissipée par déformation plastique  $\dot{W}_i^*$

Expression d'un champ de vitesses incompressibles  $\vec{u}^*$  vérifiant les conditions aux limites sur les vitesses et destiné à approcher l'écoulement réel.

c) calcul approché de la puissance dissipée par frottement  $\dot{W}_f^*$   
(aux interfaces outil-matrice)

d) bilan approché de l'énergie

$$\dot{W}_e^* \leq \dot{W}_i^* + \dot{W}_f^*$$

Le membre de droite est calculé.

Le membre de gauche contient la grandeur technologique inconnue, dont l'inégalité fournit **l'approximation par excès**.

➤ Méthode de la borne inférieure

-Exposé général de la méthode

a) calcul de la puissance des forces motrices extérieures  $\dot{W}_e$

b) Expression d'un champ de contrainte  $[\sigma^*]$

c) calcul sur l'interface d'une valeur approché de la puissance des forces extérieures  $\dot{W}_e^*$

d) Enfin  $\dot{W}_e \geq \dot{W}_e^*$

Le membre de droite est calculé.

Le membre de gauche contient la grandeur technologique inconnue, dont l'inégalité fournit *l'approximation par défaut*.

## A6. Logiciel ABAQUS

### A 6.1 Les modules ABAQUS

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.

1-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 logiciel de dessin tiers.

2-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.

3-Le module « ASSEMBLY ».

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

4-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.

5-Le module « INTERACTION ».

Grâce à 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, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

6-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.

7-Le module « MESH » .

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

8-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.

9-Le module « VISUALIZATION ».

Ce module permet de visualiser **le modèle** et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

Dans cette première étape, on dessine toutes les pièces du problème. Chaque pièce est créée grâce à l'outil 'Create Part'. Elles sont définies en fonction de leur nom (par défaut, le logiciel utilise le mot Part suivi d'un numéro, correspondant au nombre de pièces). Il faut ensuite entrer d'autres caractéristiques importantes.

#### Deuxième module: Property

Par exemple, il est nécessaire d'indiquer notre zone de travail : '3D', '2D planar', si le problème se simplifie suffisamment pour être traité comme plan; 'Axisymmetric', utile dans le cas de la représentation simplifiée du modèle. Ces deux derniers points sont utilisés dans une perspective de simplification du problème, et, par conséquent de diminution du temps de calcul. Il faut aussi déterminer son 'Type' : 'Deformable', 'Discrete Rigid' ou 'Analytical rigid', la pièce est définie soit comme déformable ou indéformable; et ses caractéristiques mécaniques qui sont au nombre de quatre: 'Solid', 'Shell', en français « coque » utilisé de préférence en '2D planar', 'Wire' et 'Point'. Tous les dessins élaborés sont bidimensionnelles, pour se rapporter dans l'espace de travail, en '3D', il suffit de stipuler que sa construction se fait soit par 'Revolution', soit par 'Extrusion', ou 'Sweep', ces outils sont là pour créer une épaisseur.

D'autres outils permettent d'améliorer le dessin en rajoutant des détails de plus en plus minutieux, comme les outils d'affinage des arêtes par implantation de congés, etc. Des modèles extérieurs peuvent être importés. Les pièces peuvent être, à tout moment, modifiées grâce à l'outil 'Feature Manager', en rajoutant, par exemple, ses dimensions afin de les modifier ensuite, nous pouvons créer autant de modèle pour obtenir différents résultats numériques.

Ce module est important dans la modélisation numérique du phénomène physique. Il faut créer le matériau, c'est-à-dire, élaborer toutes ses propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques.

Dans la partie 'Material Manager', nous avons la possibilité de rentrer différentes valeurs numériques ou lois physiques. Le logiciel Abaqus travaille sans unités, il est donc préférable de les définir avant et de s'en tenir tout au long du calcul tableau 6.1 :

Masse	Longueur	Temps	Force	Pression	Energie
M	L	T	M.L.T-2	M.L-1.T-2	M.L2.T-2
Kilogramme	mètre	seconde	Newton	Pascal	Joule
gramme	millimètre	milliseconde	Newton	MegaPascal	milliJoule
Tonne	millimètre	seconde	Newton	MegaPascal	milliJoule

Tableau 6.1. Correspondance des unités

Nous nous sommes restreints simplement aux problèmes mécaniques, dits de contact « instantané », plus précisément, le processus physique étudié est adiabatique ( $\Delta Q=0$ ).

## Troisième module : Assembly

On rassemble toutes les pièces avec 'Create Instance' afin de modéliser le phénomène physique.

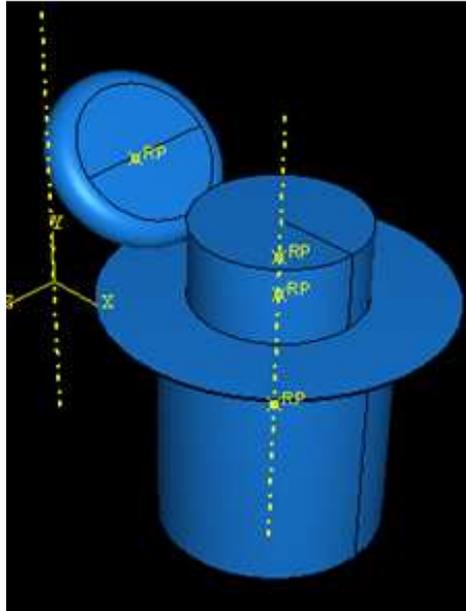


Figure 6.1 Assemblage des pièces

Le contact est réalisé avec 'Create Constraint' :

Il est crucial pour déterminer le contact entre deux pièces de définir les surfaces de contact, sa direction et la distance, ou 'Clearance', qui les séparent. Il faut déterminer une distance adéquate, éviter de trop les éloigner, pour optimiser la résolution : il faut éviter de demander au logiciel trop de calculs inutiles.

## Quatrième module : Step

L'utilisateur définit tous les critères de calcul utilisés par Abaqus dans le module Job. En particulier il détermine l'incrément, valeur du pas de temps, et la valeur du temps final, qui est un temps « virtuel », temps sans unité. Le temps réel ou physique est défini en fonction des unités (cf. tableau dans 'Material Manager').

Il faut définir les variables de sortie utiles dans le module de 'Visualisation'

## Cinquième module : Interaction

Il définit les interactions entre chaque pièce et introduit les premières hypothèses portant sur les contacts, les contraintes et les connexions éventuelles.

## Sixième module : Load

L'utilisateur définit le système à partir de 'Create Boundary Condition' et de 'Create Load' :

La partie 'BC' regroupe tous les mouvements possibles que l'on rencontre, le nombre de degrés de liberté pour chaque pièce.

La partie 'Load' regroupe l'ensemble des forces auxquelles le système est soumis.

Création du mouvement et définition des encastrements (Création des forces)

Septième module : Mesh

Voici les pièces telles qu'elles se présentent dans le menu maillage.

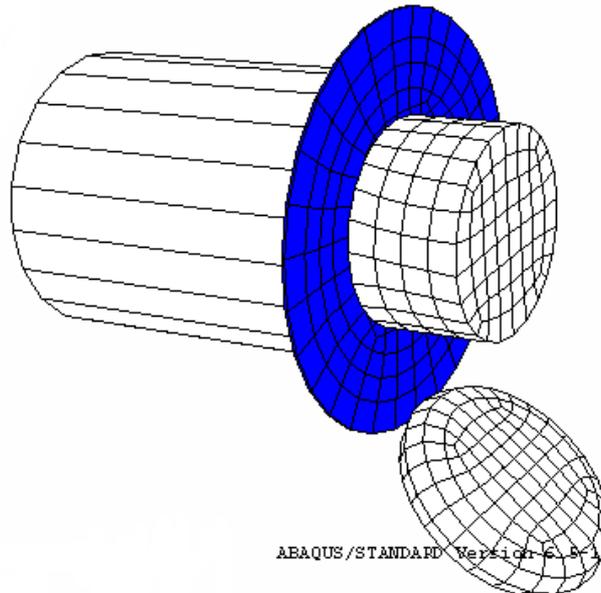


Figure 6.2 Maillage des différentes pièces

Afin qu'ABAQUS maille correctement, il faut remplir des conditions satisfaisantes et facilitant le calcul numérique, dans le module 'Mesh'. En effet, l'art du maillage repose essentiellement sur deux critères : Les éléments de maillage (par exemple, hexaédriques, cubiques, tétraédrique dans « Mesh Control ») et la complexité topologique de chaque pièce. Plus la difficulté est accrue, plus la couleur se rapproche du rouge, et inversement, plus le maillage sera aisé, plus la pièce se verra colorée en vert. Ainsi, elles doivent être nécessairement partitionnées, dans l'optique d'optimiser le temps de calcul ou CPU, via l'outil « create partition ».

La partition est intimement liée à trois grands types : 'Edge', 'Face' et 'Cell'.

Plusieurs méthodes s'offrent aux utilisateurs. La coupe d'une face ou d'une arête. Puis, il faut choisir avec quelle géométrie on va partitionner la pièce (un plan, une courbe ...).

Par l'exemple, il faut initialement créer un plan de coupe, avec « create datum », puis choisir sa méthode de création, en positionnant le plan de coupe via trois points.

Elle est aussi utile pour redéfinir des zones plus importantes, c'est à dire, de pouvoir mailler différemment une même pièce pour mettre en exergue les surfaces de déformation aux endroits « désirés ». Il n'est pas forcément important de mailler trop finement l'ensemble.

Le menu « Mesh Control » : est l'outil rassemblant l'ensemble des éléments utilisables par ABAQUS.

La fonction « hexa-dominated » est une des plus intéressantes puisqu'elle combine deux systèmes de maillage, deux éléments différents: l'hexaèdre et le tétraèdre). Le maillage se construit prioritairement avec des hexaèdres; si le logiciel rencontre une difficulté, lié à l'hétérogénéité des structures, ce dernier utilisera, par défaut, le type tétraédrique.

L'utilisateur définit la taille des éléments grâce à l'outil 'Instance', dans le menu 'Seed'. Ainsi, il est possible de resserrer le maillage aux endroits les plus significatifs pour notre étude ou l'élargir aux endroits où une précision importante n'est pas nécessaire.

Il faut impérativement choisir les arêtes dans lesquelles la taille des éléments varie, « edge biased » dans le menu « seed », et lui affecter un coefficient, qui indique le nombre d'éléments voulus sur ces arêtes :

Nous obtenons la répartition suivante :

Avec un coefficient de 4, nous avons des éléments de tailles différentes.

« seed part instance » détermine le nombre d'éléments sur le reste du cylindre. Ici, il détermine tout simplement leur taille.

« mesh instance » ou « mesh region » est l'outil pour visualiser le maillage définie auparavant:

Cette partie du flan est constitué de trois éléments de tailles différentes, (cf. « edge biased »), plus grands que le reste du maillage du flan.

Il n'est pas nécessaire d'avoir des tailles différentes; pour cela, il suffit de mettre le coefficient à 1. D'autres fonctions peuvent entrer en ligne de compte comme « edge by number » ou « edge by size »: choix du nombre ou de la taille des éléments sur la petite zone.

La taille ou le nombre d'éléments déterminés par l'utilisateur ne sont que des indices pour le logiciel; il redéfinit le nombre ou la taille minimal des éléments assurant une bonne continuité du maillage.

Ainsi, en utilisant la fonction « edge biased » avec un coefficient égal à 1, nous en obtenons 3 :

Huitième module : Job

Le module 'Job' reprend les caractéristiques de calcul dans le module 'Step'. Nous pouvons lancer plusieurs calculs différents.

Neuvième module : Visualisation

L'utilisateur voit le résultat du calcul numérique dans 'Result' : soit par la visualisation des déformations dans 'Field Output' : Par Exemple, les déformations, les contraintes, les vitesses ou les forces nodales ; soit par les courbes dans '**History Output**' : Par exemple, l'énergie cinétique ou l'énergie totale de l'ensemble du modèle, l'énergie de dissipation ou des déformations.