

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Frère Mentouri Constantine 1  
Instituts des Sciences et Techniques Appliquées

## **Cour du Module FAB 7**

### **Procédés de fabrications**

**Pour les étudiants 2<sup>ème</sup> année**

**Spécialité Productique Mécanique Appliquée PMI**

**Année universitaire 2019/2020**

Table des matières :

## Objectifs

### Introduction

#### I - Chapitre I

1. Découpage .....	5
1.1. <i>Le POINÇON</i> .....	5
1.2. <i>La MATRICE</i> .....	5
1.3. <i>Principe</i> .....	5
1.4. <i>Désignation des opérations de découpage</i> .....	6
1.5. <i>Valeur des jeux suivant la matière</i> .....	7
1.6. <i>Effort principal de découpage</i> .....	8
1.7. <i>Pourcentage de déchet</i> .....	9

#### II - Chapitre II

1. Pliage .....	12
1.1. <i>Pliage en l'air</i> .....	12
1.2. <i>Pliage en vé</i> .....	13
1.3. <i>LE PLI</i> .....	13
1.4. <i>Tableau du positionnement de la fibre neutre.</i> .....	14
1.5. <i>La cotation en pliage.</i> .....	14
1.6. <i>Le rayon de pliage appelé aussi rayon intérieur de pliage ou Ri</i> .....	15
1.7. <i>L'autre paramètre, essentiel en pliage</i> .....	15
1.8. <i>Effort de pliage</i> .....	16
1.9. <i>Les paramètres de pliages sur une presse plieuse</i> .....	16

#### III - Chapitre III

1. Emboutissage .....	19
1.1. <i>Procèdes d'emboutissage</i> .....	20
1.2. <i>Effort d'emboutissage</i> .....	22
1.3. <i>Calcul des flans</i> .....	24

## I-Découpage

### Généralités

Le découpage à froid consiste à détacher par CISAILEMENT un contour donné d'un PRODUIT PLAT (TOLE), l'opération se fait sur une presse par l'intermédiaire d'un outil dont les parties travaillantes (ARETES DE COUPE) sont le poinçon et la matrice qui glissent l'une par rapport à l'autre. L'élément de tôle détaché est appelé le FLANC ou la DEBOUCHURE.

### Eléments principaux constituant un outil de découpe

**Le POINÇON** : Pièce pleine dont la base a la forme de la pièce à découper. Il est de SECTION CONSTANTE.

**La MATRICE** : Pièce ajourée de façon à ce que le poinçon s'ajuste dans l'ouverture avec un AJUSTEMENT DE JEU déterminé. Elle comporte UNE DEPOUILLE d'environ 5% pour éviter le laminage des flans sur une trop grande longueur, et réduire l'effort fourni par la presse.

La course des poinçons doit être réglée pour ne pas pénétrer dans la matrice (éviter usure et dégâts...).

### Principe

Une partie de l'outil associant poinçon(s) et matrice(s) est bridée sur la table fixe de la presse, tandis que l'autre partie est animée du mouvement alternatif du coulisseau. A chaque course, un ou plusieurs découpages sont effectués.

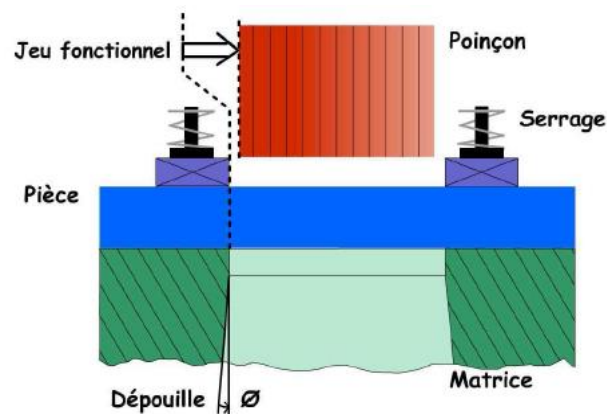


Figure : Principe de découpage.

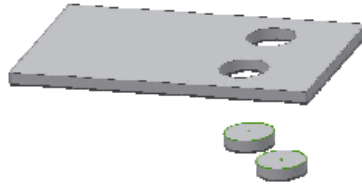
### Rôle

Pour un bon fonctionnement de l'outil, il est nécessaire d'assurer un jeu fonctionnel entre la matrice et le poinçon. Il réduit LE RISQUE DE GRIPPAGE OU DE RUPTURE DE LA MATRICE.

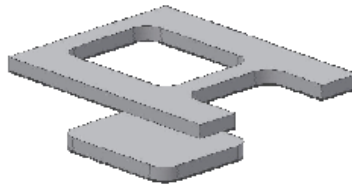
Il permet également de garantir une coupe nette est franche.

### Désignation des opérations de découpage

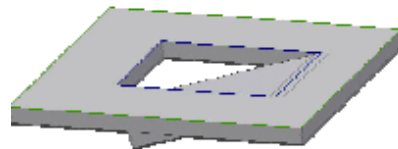
POINÇONNAGE : On conserve la partie extérieure. Le déchet est la débouchure.



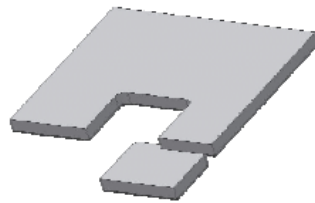
DECOUPAGE : Obtention d'un flan par séparation suivant une ligne fermée dans une bande ou une feuille. Le déchet est appelé squelette.



CREVAGE : Découpage partiel.



ENCOCHAGE : Découpage débouchant sur un contour.



ARASAGE ou REPASSAGE : Découpage en reprise (précision et état de surface).



DETOURAGE : Finition d'un contour déjà ébauché, modifié au cours d'une déformation.



**Valeur des jeux suivant la matière**

La valeur du jeu s'évalue en fonction de l'épaisseur de la bande (de façon à ce que les deux amorces de ruptures se rejoignent parfaitement).

Laiton et Cuivre :  $1/20^{\text{ème}}$  de l'épaisseur de la bande  $J = 1/20 \times e$

Acier  $\frac{1}{2}$  dur :  $1/16^{\text{ème}}$  de l'épaisseur de la bande  $J = 1/16 \times e$

Acier :  $1/14^{\text{ème}}$  de l'épaisseur de la bande  $J = 1/14 \times e$

Alliage d'aluminium :  $1/10^{\text{ème}}$  de l'épaisseur de la bande  $J = 1/10 \times e$

**Effort principal de découpage**

Les efforts de découpage sont calculés par une formule empirique qui a l'avantage de fournir une bonne approximation tout en étant très simple d'utilisation :

$$F = P \times e \times Rg$$

F : effort de découpage en (daN)

e : épaisseur de la tôle en (mm)

P : périmètre de profile détaché en (mm)

Rg : résistance pratique au cisaillement (daN/mm<sup>2</sup>)

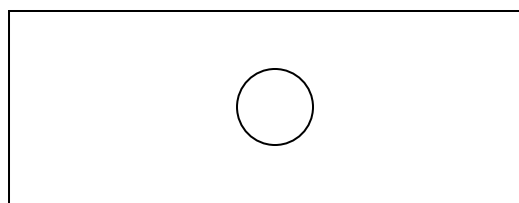
La formule précédente nécessite l'utilisation de Rg (résistance pratique au cisaillement exprimé en daN/mm<sup>2</sup>). On admet généralement que Rg correspond à 8/10 de Rm.

Rm : résistance à la rupture par extension (daN/mm<sup>2</sup>).

Matériaux	Rm (daN/mm <sup>2</sup> )
Acier à 0,1% de carbone (recuit)	19
Acier à 0,2% de carbone (recuit)	25
Acier à 0,3% de carbone (recuit)	30
Acier inoxydable 40	49 à 69
Aluminium (doux)	12,5
Duralumin	45
Laiton (recuit)	18

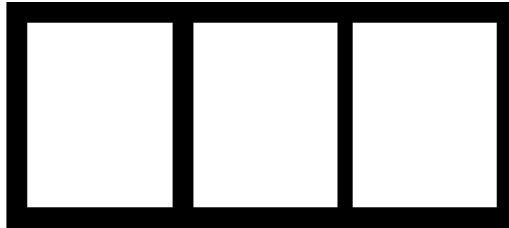
**Effort d'extraction**

C'est l'effort NECESSAIRE POUR DECOLLER LA BANDE DE METAL DU POINÇON.



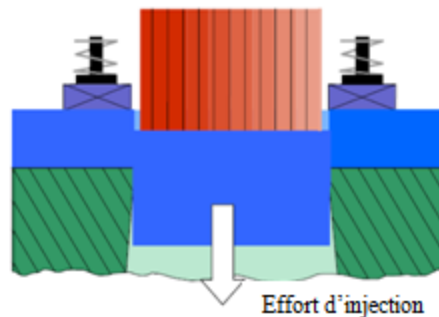
Cet effort varie suivant l'importance du déchet autour de celui-ci. Pour un découpage en pleine tôle, donc avec d'important déchet, l'effort d'extraction est égal à 7% de l'effort de découpage.  $F_{\text{extractions}} = 7\% F_{\text{découpage}}$ .

Pour une faible perte de métal (déchet faible), l'effort d'extraction est égal à 2% de l'effort de découpage.  $F_{\text{extractions}} = 2\% F_{\text{découpage}}$ .



### Effort d'éjection

C'est l'effort nécessaire POUR SORTIR LA PIÈCE DECOUPEE DE LA MATRICE. Cet effort est d'environ 1,3% de l'effort de découpage.  $F_{\text{injections}} = 2\% F_{\text{découpage}}$ .



### Effort total de découpage

L'effort de découpage est égal à la somme des différents efforts. son résultat permet de déterminer la presse adéquate. (L'effort correspondant à la presse d'exprime le plus généralement en tonne-force).

$$F = F_{\text{principal}} + F_{\text{extraction}} + F_{\text{ejection}}$$

### Pourcentage de déchet

La qualification d'un choix de mise en bande est généralement réalisée au travers du calcul de pourcentage de déchet. Pratiquement, il s'agit d'évaluer le rapport entre la surface de déchet et la surface totale de tôle utilisée pour réaliser la pièce.

Le pourcentage de déchets vaut:

$$\%_{\text{dechet}} = S_{\text{dechet}} / S_{\text{tôle}} \times 100$$

Ou Le surface de déchets vaut donc

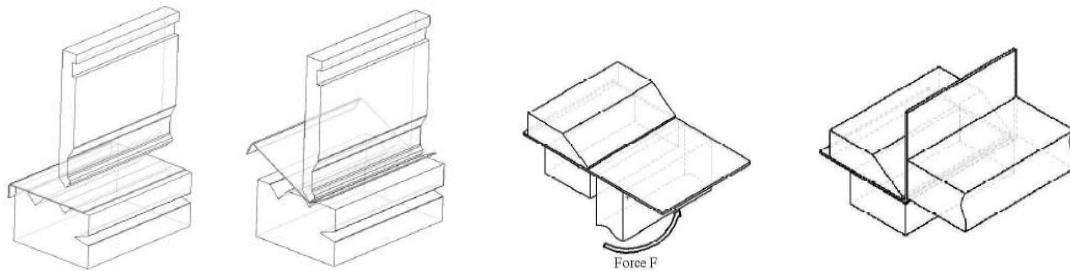
$$S_{\text{dechet}} = S_{\text{tôle}} - S_{\text{pièce}}$$

## II-Le pliage :

### Généralité :

Le pliage est une opération de *conformation à froid* qui consiste à déformer une tôle plane en changeant la *direction de ses fibres* de façon brusque suivant un *angle*.

Il existe plusieurs techniques pour plier une pièce : pliage en l'air dans une presse-plieuse, pliage en frappe, pliage sur plieuse universelle.

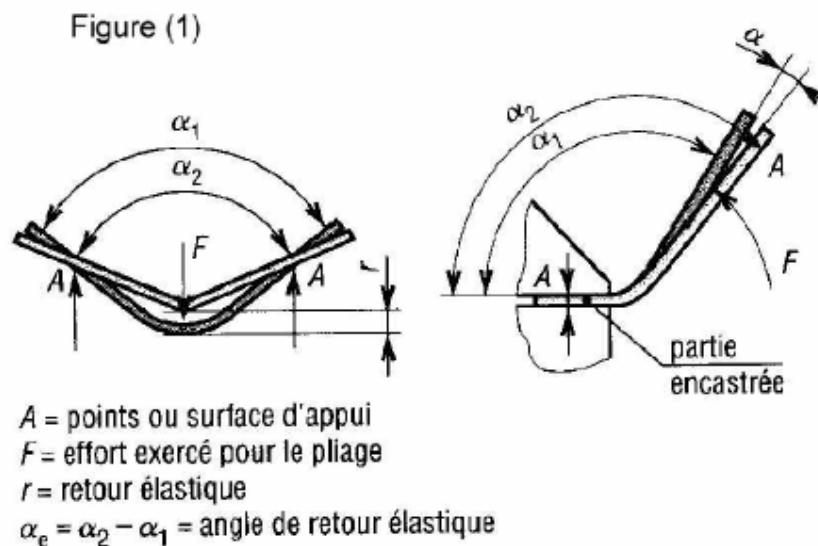


### Principe du pliage

#### Pliage en l'air :

Sous l'action d'une force appliquée sur un flan (ou sur une ébauche) reposant sur deux ou plusieurs appuis ou encastré à une extrémité, le produit est fléchi.

Lorsque cesse l'effort, si le fléchissement a été suffisant, le flan ne reprend pas sa forme initiale mais une forme intermédiaire, qui est d'autant plus éloignée de celle obtenue par un fléchissement maximum, que l'élasticité du métal est grande.

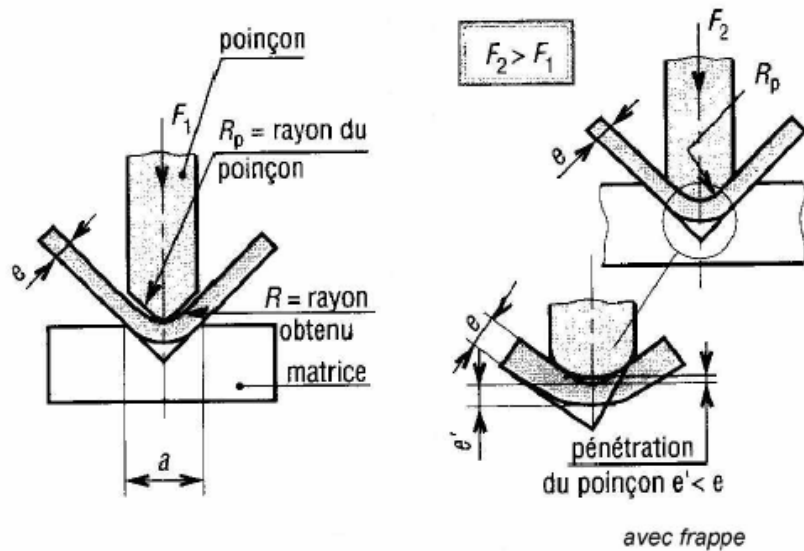


#### Pliage en vé :

Suivant la position du poinçon en fin de course, différents angles intermédiaires peuvent être obtenus avec le même outillage, l'angle terminal étant celui du vé, augmenté du retour élastique.

Si en fin de pliage, à fond de vé, le poinçon continue sa course, il provoque un forgeage local par un léger encastrement de son extrémité dans l'épaisseur de la tôle.

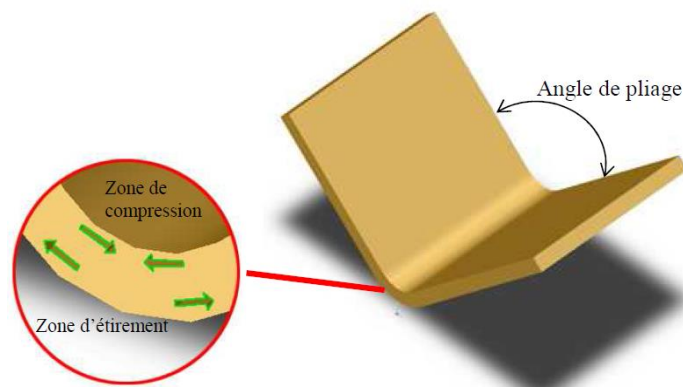
Le métal déplacé par déformation plastique, les contraintes des zones comprimées avec celles qui sont tendues ; le retour élastique est quasiment supprimé. C'est l'opération de « pliage avec frappe ».



## LE PLI.

### Au niveau des fibres, que se passe-t-il ?

Lors du pliage, la tôle subit une pression qui change l'orientation des fibres. Les fibres intérieures sont comprimées alors que celles extérieures subissent un étirement. L'angle obtenu est appelé « angle de pliage ».





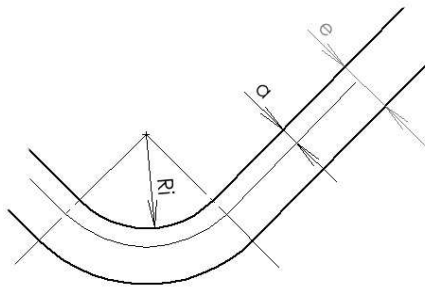
Entre les deux zones de déformations, la fibre neutre qui ne subit aucun allongement ni raccourcissement sera la base de notre calcul de la *longueur développée*.

En effet, si nous savons déterminer la longueur de cette fibre qui ne subit aucune déformation après pliage, nous trouverons la longueur de la tôle avant pliage.

#### Tableau du positionnement de la fibre neutre.

Elle se situe à la distance  $a$  du bord intérieur. Suivant le rapport  $R_i/e$ ,  $a$  varie comme suit :

$R_i / e$	environ 1	environ 2	environ 3
$a$	$e/3$	$2 e / 5$	$e/2$

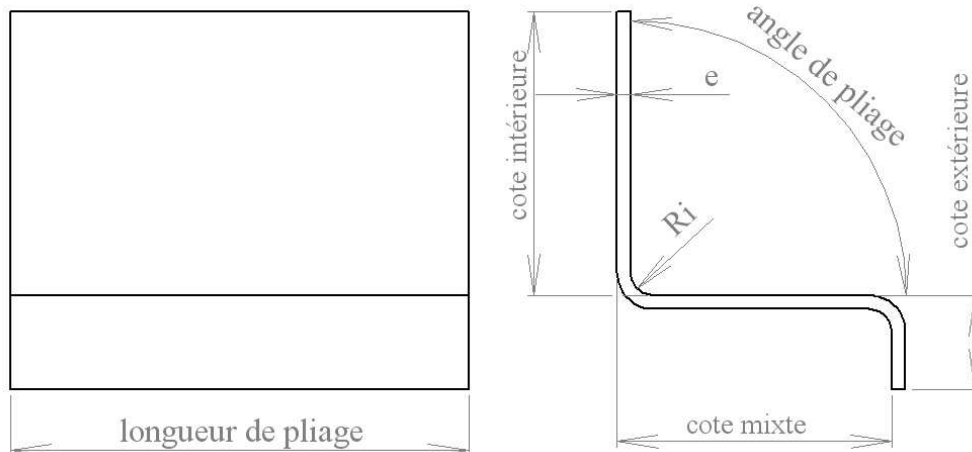


#### La cotation en pliage.

En pliage, plusieurs cotations apparaissent : la longueur d'un bord plié, le rayon de pliage, l'angle de pliage, la longueur de pliage, etc. ... Nous allons passer en revue tous ces paramètres.

#### La cotation d'une pièce pliée :

La cotation d'un bord plié se fait en intérieur ou extérieur ou même suivant des cotes mixtes entre l'intérieur et l'extérieur, cela en fonction du dessinateur ou des contraintes à respecter pour certaines pièces (contraintes d'ajustement par exemple).



### Le rayon de pliage appelé aussi rayon intérieur de pliage ou Ri.

Le rayon de pliage est défini selon la machine employée et les contraintes du dessin de la pièce. La plupart du temps, le dessin n'impose pas de rayon. C'est la machine utilisée qui définira à ce moment sa valeur.

Le rayon intérieur dépend du Vé :

$$Ri = Vé / 6$$

A noter que le rayon intérieur possible varie aussi en fonction de la matière et de son coefficient d'allongement. Plus le rayon intérieur pourra être petit, on observe des défauts de criquage (cassure à l'extérieur du pli).

En fonction de l'épaisseur de la tôle, nous pouvons déterminer la valeur du Vé tels que :

· La valeur du Vé :

En général on utilise pour des pièces d'épaisseur inférieure à 4 mm, on prend :

$$Vé = 6 \text{ à } 8 \times \text{ép.}$$

Pour des pièces d'épaisseur supérieure à 4 mm on utilise :  $Vé = 10 \text{ à } 12 \times \text{ép.}$

**L'autre paramètre, essentiel en pliage :** la longueur développée.

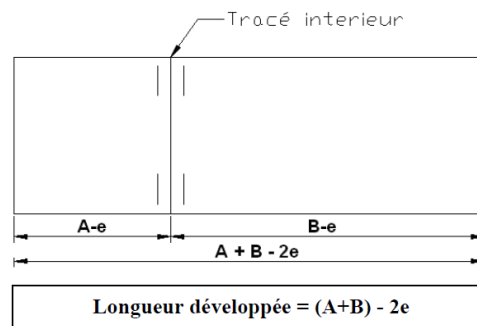
Il est défini par le dessin de définition de la pièce et peut être réalisé suivant les capacités machine. L'angle le plus travaillé est celui de 90° (entreprises de tôlerie fine pour des coffrets, armoire, etc. ...)

La longueur développée d'une pièce pliée varie en fonction de l'angle de pliage.

Le  $\Delta L$  peut être comparé à la perte de longueur de matière entre l'état final (pièce pliée) et l'état initial (pièce à plat).

Note importante : il faut savoir que chaque fois que l'en plie la pièce, la pièce pliée s'allonge.

Donc la longueur de pièce initiale est plus petite que la somme des longueurs pliées.



### Calcul de la longueur développée des tôles pliées :

- La longueur développée est calculée en **Fibre moyenne** ou **Fibre neutre**.
- La position de la Fibre moyenne est fonction du **rayon intérieur** et de l'**épaisseur**

**Cas du Rayon :**

$$LD = X + Y + [(R_m \times \pi) / 2]$$

$$R_{Moyen} = \text{Rayon intérieur} + d$$

$$d = e/3 \text{ quand } R_{int.} > 4 e$$

$$d = e/2 \text{ quand } R_{int.} < 4 e$$

**Effort de pliage**

Formule utilisée pour le calcul de l'effort vertical de pliage, pour le pliage en l'air, on adopte la relation suivante :  $F = k L e^2 R_m / V_é$ .

L = longueur du pli (en mm)

e = épaisseur à plier (en mm)

Vé = ouverture du vé (en mm)

Rm = résistance à la rupture du métal à plier (en daN/mm<sup>2</sup>)

k = 1,4 pour Vé = 6 \* e

k = 1,33 pour Vé = 8 \* e

k = 1,24 pour Vé = 12 \* e

k = 1,20 pour Vé = 16 \* e

**Les paramètres de pliages sur une presse plieuse :**

La détermination des paramètres qui influencent le pliage sur presse plieuse, commence par la lecture d'un abaque de pliage. Il en existe plusieurs sortes, souvent dépendants des machines utilisées (Presse plieuse Amada, LVD, Colly, etc. ...)

L'abaque suivant est tiré d'une presse-plieuse Promécam.

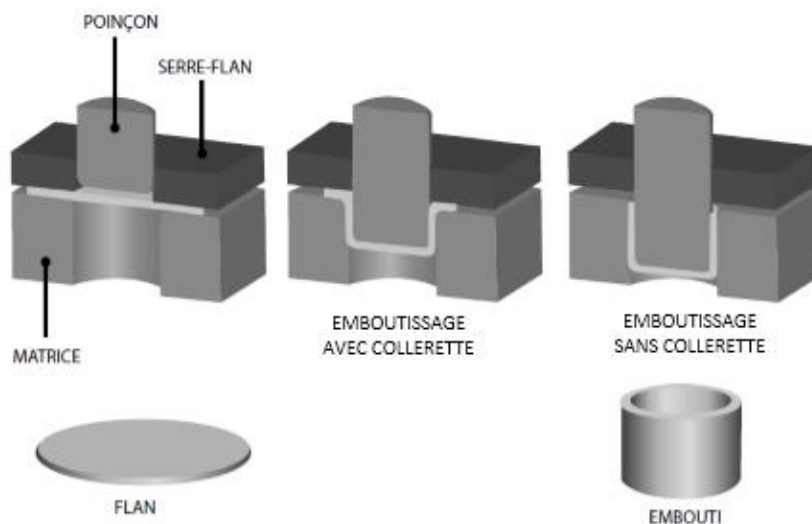
	V	6	8	10	12	16	20	25	35	40	50	63
	b mini	4	5.5	7	8.5	11	14	17.5	22	28	35	45
	ri	1	1.3	1.6	2	2.6	3.3	4	5	6.5	8	10
épaisseur	1	100	80	70								
	1.5			150	130	90						
	2				220	170	130					
	2.5					260	210	170				
	3						300	240	190			
	4							420	340	270		
	5								520	420	330	
6									600	480	380	
Force F de pliage (en kiloNewton/mètre)												

**III-Emboutissage**

## Généralité

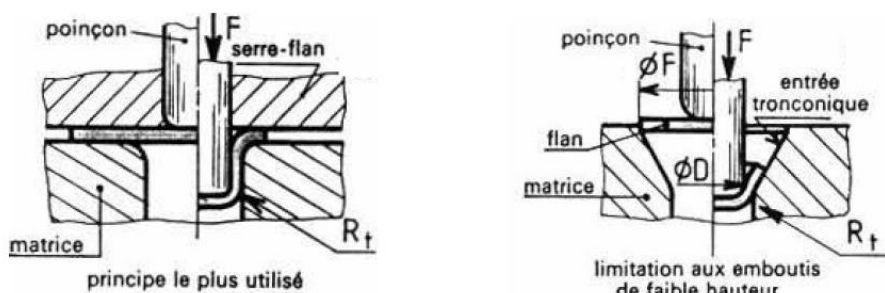
L'emboutissage est un procédé de formage qui consiste à transformer une tôle plane en une forme creuse de géométrie plus ou moins complexe. Ce procédé nécessite une presse hydraulique ou mécanique équipée d'un outillage constitué essentiellement par un poinçon et une matrice. En général, on ajoute un serre-flan pour prévenir le plissement de la tôle en périphérie du poinçon. Le métal subit une déformation permanente lorsque la tôle est entraînée par le poinçon dans la matrice. On nomme « embouti » le corps creux avec une paroi plus ou moins cylindrique et un fond, obtenu par emboutissage.

La figure suivante montre trois séquences de réalisation d'un embouti à partir d'un flan prédécoupé dans une tôle :



## Définition

L'emboutissage est un procédé de formage à froid par déformation plastique d'une surface de métal entraînée par un poinçon dans une matrice. Cette déformation est difficilement réversible ; de ce fait, on considère que la pièce obtenue n'est pas développable.

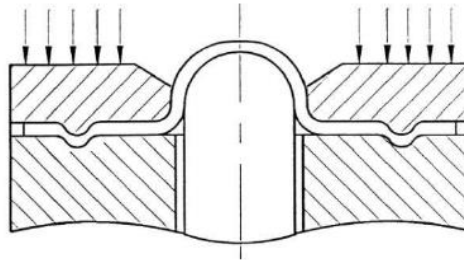


## Procèdes d'emboutissage

Il existe trois procédés d'emboutissage suivant la forme de pièce à obtenir.

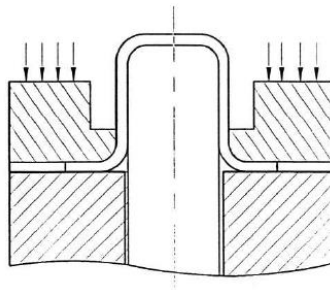
### **Emboutissage en expansion**

Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre flan et matrice, si besoin. La tôle ne se déforme pas, alors qu'elle s'allongeant sur le poinçon dans une ou plusieurs directions, nous disons que nous travaillons en expansion.



### **Emboutissage en rétreint**

Si la pièce a une forme cylindrique droite (base circulaire ou quelconque) de forte profondeur on laisse glisser le flan entre serre flan et matrice, la déformation sur le poinçon est limitée aux rayons de poinçon, la majeure partie de la déformation se fait par rétrécissement sur la matrice, c'est l'emboutissage en rétreint.



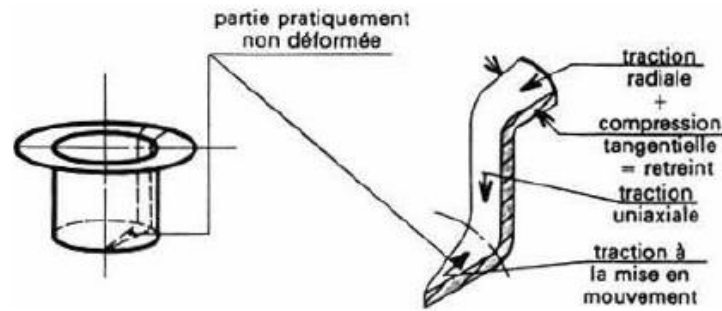
### **Emboutissage quelconque**

Une opération d'emboutissage quelconque est la combinaison de ces deux modes dans une opération mixte, un des gros problèmes est de régler le glissement sous serre flan suffisamment faible pour permettre les déformations et éviter les plis, suffisamment fort pour éviter un étirage trop important qui conduirait à la rupture.

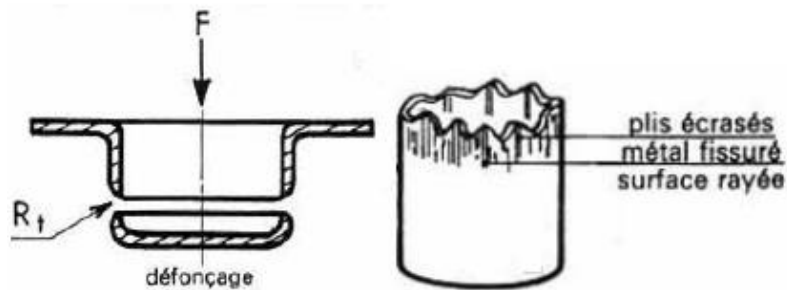
### **Effort d'emboutissage**

#### **Analyse des déformations**

Au cours de l'opération d'emboutissage la tôle est soumise à des contraintes très complexes : de compression de direction tangentielle et de traction de direction radiale.



Pour qu'il y ait emboutissage sans déchirure, il faut que le fond de l'emboutissage résiste à la pression du poinçon, si on prend ( $F_d$ ) comme effort nécessaire pour découper le fond, on peut admettre que l'effort d'emboutissage ( $F_e$ ) ne doit pas dépasser la moitié de cet effort :  $F_e < 1/2 F_d$ .



Pour la détermination de l'effort nécessaire à l'emboutissage on doit tenir compte :

- De la forme de l'emboutis
- De la qualité et de l'épaisseur de la tôle
- De la vitesse d'emboutissage (de 0.2 à 0.75 mm/s selon la nature de la matière)
- De la géométrie de l'outil
- De la pression du serre flan
- De la lubrification

### Détermination des efforts et énergies nécessaires au formage des tôles

Le choix d'une presse découle directement de la connaissance de l'effort total ( $F_f$ ) et de l'énergie totale ( $W_f$ ) requis par le formage de la pièce. Cet effort (et cette énergie) résulte de la somme de l'effort de formage proprement dit ( $F$ ) {d'énergie ( $W$ )} et de l'effort serre flan ( $F_{st}$ ).

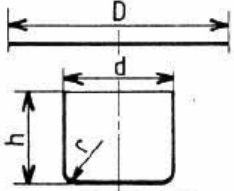
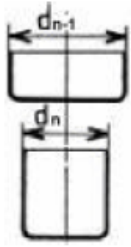
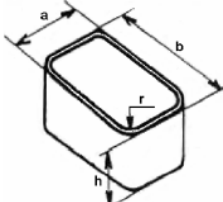
Le tableau 2 les formules permettant de calculer  $F$  et  $W$  dans les cas usuels et le tableau 1 les valeurs de pressions serre flan  $P_{sf}$  selon la nature du matériau.

Tableau 1 : valeur de l'effort serre flan

Matière	Psf	
	daN/mm <sup>2</sup>	bar
Acier doux	2.5 à 3	25 à 30
Laiton	2	20
Cuivre	1.5	15
Acier inoxydables	3.5 à 7	35 à 70
Aluminium	1.2	12

Ces valeurs sont minimales, elles sont parfois insuffisantes pour éviter la déformation des plis.

Tableau 2 : valeur de formule d'effort et d'énergie

Opération	Effort (N)	Energie (J)	Rapport d'emboutissage				
			d/D	0.5	0.6	0.7	
Pièce cylindrique 1er passe 	$Fe = P.d.e.Rm.k$	$We = (h.Fe.k1)/1000$	K	1	0.8	0.7	
			K1	0.8	0.7	0.7	
			d/D	0.7	0.8	0.9	
			K	0.6	0.5	0.4	
			K1	0.7	0.6	0.6	
$n^{me}$ passe 	$Fen = 0,5.Fen - 1 + k.dn.e.Rm$	$We = (h.Fe.k1)/1000$	$d_n/d_{n-1}$	0.7	0.75	0.8	0.85
			k	0.8	0.6	0.5	0.35
Pièce quelconque	$Fe = p.e.Rm$	$We = (h.Fe)/1000$					
Pièce Quadrangulaire 	$Fe = e.Rm.$ $(2.K_A.r + K_B.b)$	$W_E = (0,7.h.Fe)/1000$	$K_A = 0.5$ pour les emboutis peu profonds = 2 pour les emboutis dont $h = 5$ à $6r$ . $K_B = 0.2$ pour un jeu important et pas de SF = 0.3 à 0.5 si écoulement facile et faible SF = 1 si fortes pressions SF.				

Où la contrainte limite du matériau ( $R_m$ )

Matériaux	$R_m$ (daN/mm <sup>2</sup> )
Acier doux	19
Acier inoxydable 40	49 à 69
Aluminium	12.5
Duralumin	45
Laiton	18

Coefficient qui dépend du rapport d'emboutissage ( $k$ )

Diamètre initial du flan ( $D$ )

Diamètre du poinçon ( $d$ )

Pression serre flan ( $P$ )

Épaisseur de la tôle ( $e$ )

Rayon de l'embout ( $r$ )

### Calcul des flans

La première étape avant de lancer la fabrication (série) consiste à déterminer les dimensions du flan, ceci pour des raisons économiques (calcul de la quantité de matière, détermination du nombre de passe) et pour des raisons techniques (forme la mieux adaptée à un bon écoulement du métal dans l'outil).

Il existe un grand nombre de méthodes de calcul de flan, toutes basées sur le même principe (que l'emboutissage s'effectue avec ou sans diminution de l'épaisseur), le volume en matière de la pièce produite est égal au volume du flan.

Plusieurs abaques et tableaux sont aisément utilisables pour la détermination des flans suivant la forme de l'emboutis.

### Méthode analytique

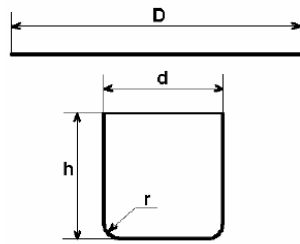
#### Théorème de Guldin.

La surface engendrée par une ligne plane tournant autour d'un axe situé dans son plan ne le traversant pas, est égale au produit de la longueur développée de cette ligne par la circonférence décrite par son centre de gravité.

Exemple : (cas des emboutis cylindriques à fond plat), en négligeant le rayon de raccordement de la paroi et du fond, si  $r \leq d/10$ .

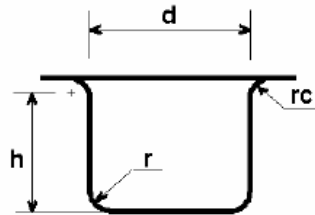


1 – Diamètre initial du flan sans collerette



$$D = \sqrt{d^2 + 4dh}, h = \frac{D^2 - d^2}{4d}$$

2- Diamètre initial du flan avec collerette



$$D = \sqrt{d^2 + 4d(h + 0.57(r + rc) - 0.52(r^2 - rc^2))}$$

3-Diamètre initial du flan pour d'autres formes

 $D = \sqrt{2dt}$	 $D = \sqrt{d^2 + 4dh}$
 $D = \sqrt{2d^2}$	 $b = \sqrt{d_2^2 + 4d_1 h}$
 $D = \sqrt{d_2^2 + d_1^2}$	 $D = \sqrt{d_1^2 + 2L(d_2 + d_1) + 4d_2 h + d_3^2 - d_2^2}$
 $D = \sqrt{2d^2 + 4dh}$	 $D = \sqrt{d_1^2 + 4d_1 h_1 + 2L(d_2 + d_1) + 4d_2 h_2}$
 $D = \sqrt{d_2^2 + 4L^2 + \pi r (d_1 - 0.2 r)}$	 $D = \sqrt{d_1^2 + 4(d_3 h_3 + d_2 h_2 + d_1 h_1)}$
 $D = \sqrt{d^2 + 4L^2}$	 $D = \sqrt{(d - 2r)^2 + 4d(h - r) + 2\pi r (d - 0.7 r)}$