

# Procédés de Fabrication I - IGI

## Chapitre 3. Formage des métaux

10 novembre 2023

# Première partie

1. Introduction
2. Forgeage
3. Extrusion et tréfilage
4. Laminage

## 3.1.1 Généralités

### Définition et principe

- *Les procédés de formage des métaux utilisent des déformations **plastiques** pour changer la forme de la matière.*
- *Les déformations résultent de l'utilisation d'un **outil de forme** (matrice, poinçon)*
  - *L'outil applique des contraintes **supérieures à la limite élastique**.*
  - *Les contraintes appliquées sont gén. en compression, mais parfois aussi en traction, en flexion et même en cisaillement (comme dans la coupe).*
  - *La géométrie de l'outil détermine la forme finale de la pièce.*
- *La **formabilité** des métaux est favorisée par une grande ductilité et une faible limite élastique.*
- *La température peut favoriser la formabilité (procédés de formage **à chaud**) au détriment de la précision (problème de retrait).*

### Atouts principaux du formage

- *Possibilité de fabriquer des pièces de forme relativement complexe.*
- *La gamme des matériaux formables est assez étendue.*
- *Adapté à des productions en grande ou très grande série.*

## 3.1.2 Généralités (suite)

### Classification des procédés de formage

- On distingue les procédés de formage selon qu'ils s'appliquent à des feuilles ou à des pièces massives :

#### Procédés de formage

<b><i>Pièces massives</i></b>	<b><i>Feuilles</i></b>
<b><i>Laminage</i></b> <b><i>Forgeage</i></b> <i>Martelage, pressage</i> <i>Matriçage, forgeage libre</i>	<b><i>Pliage</i></b> <b><i>Emboutissage</i></b>
<b><i>Extrusion</i></b>	<b><i>Découpage</i></b> <i>Poinçonnage</i>
<b><i>Tréfilage</i></b>	

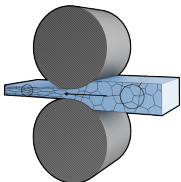
(cf. Annexes 1, 2, 11)



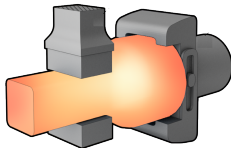
## 3.1.3 Classification des techniques de formage

### Pièces massives

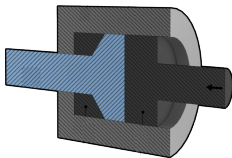
source : Manufacturing guide



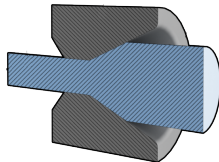
***laminage***



***forgeage (matriçage)***



***extrusion***

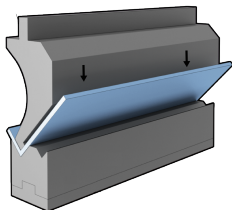


***tréfilage***

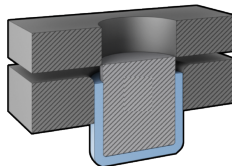
## 3.1.4 Classification des techniques de formage

### Feuilles

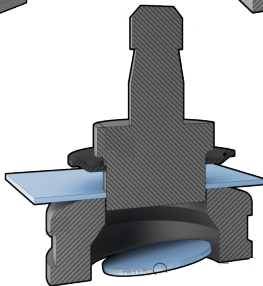
source : Manufacturing guide



*pliage*








*emboutissage*



*découpage (poinçonnage)*

## 3.1.5 Formage des métaux

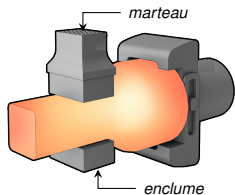
### Quelques adresses en Suisse

<i>Laminage</i>	 Lamineries MATTHEY SA	<b>Lamineries Matthey SA</b> Rte de Neuchâtel 8 CH-2520 La Neuveville
<i>Emboutissage/matriçage</i>	 MF	<b>Meylan Frères SA</b> Rte du Planoz 31 CH-1348 Le Brassus
<i>Emboutissage/matriçage</i>	 R	<b>Rihs AG</b> Grenchenstrasse 52 CH-2544 Bettlach
<i>Découpage fin</i>	 FEINTOOL	<b>Feintool AG</b> Industriering 8 CH-3250 Lyss
<i>Extrusion</i>	 Constellium	<b>Constellium Valais SA</b> rue de l'Industrie 15 CH-3965 Chippis

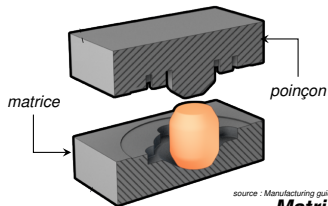
## 3.2.1 Forgeage

### Principe

- En forgeage, on met en forme la pièce en la compressant dans une matrice.
- En forgeage à **chaud** la ductilité du matériau est améliorée. Les pièces **forgées à froid** ont de meilleures propriétés mécaniques et sont plus précises.
- On distingue les techn. de forgeage suivant le mode d'application de la pression :  
**mode de compression** : compression par impact    compression graduelle  
**type de forgeage** : martelage    pressage
- On distingue aussi les techniques de forgeage selon la façon avec laquelle la matrice contraint l'écoulement latéral du matériau (forgeage libre et matriçage).



**Forgeage libre**

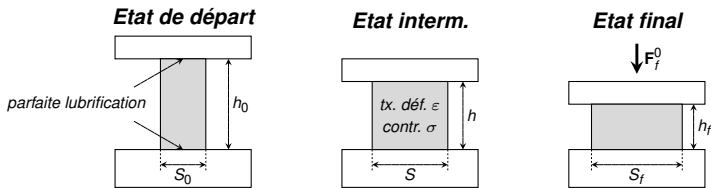


source : Manufacturing guide

**Matriçage**

## 3.2.2 Forgeage

### Force en forgeage libre (frottement négligé)

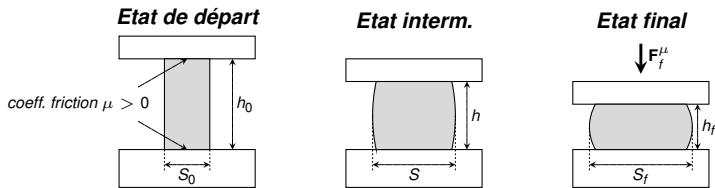


### On néglige la frottement entre lopin et matrice

- Dans ce cas, le forgeage libre est une **compression uniforme**.
- Les lois du chap. 2 (Hooke, Ludwik, ...) donnent  $\sigma$  en fonction de  $\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$ .
- On obtient la force de forgeage :  $F_f^0 = S_f \sigma$ , par exemple :
  - $F_f^0 = S_f K \left( \ln \frac{h_0}{h_f} \right)^n$  (Ludwik)
  - $F_f^0 = S_f \sigma_e = S_0 R_e$  (comportement plastique idéal)

## 3.2.3 Forgeage

Force en forgeage libre (frottement pris en compte)



Le frottement entre l'opin et matrice est prise en compte

- Dans ce cas, l'état de contrainte n'est plus une **compression uniforme**.
- Différents modèles permettent d'étudier cet état de contrainte (lignes de gliss.).
- Le résultat est que la force de forgeage avec frottement est une correction de la force de forgeage sans frottement :

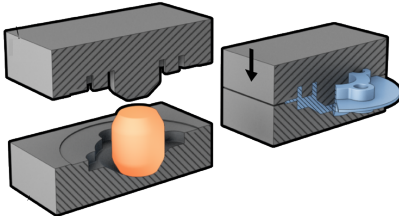
$$F_f^\mu = \left( 1 + C\mu \frac{\sqrt{s_f}}{h_f} \right) F_f^0 \quad \text{avec } C = C(\text{géom, mat. } \dots) > 0.$$

$C \simeq 0.45$  pour une section circulaire.

## 3.2.4 Procédés de forgeage avancé

### Matriçage, principe, schéma et exemple de pièces

- *On donne à l'outil la forme inverse de la pièce à fabriquer.*
- *Le plan de joint entre matrice inférieure et supérieure (poinçon) n'est pas complètement ajusté et permet l'écoulement du matériau en excès. Il en résulte une bavure qui devra être éliminée en finition (ébauche à usiner).*
- *Plusieurs passes possibles (matriçage progressif), avec différents outils de forme.*
- *Ce processus peut se faire à chaud ou à froid.*

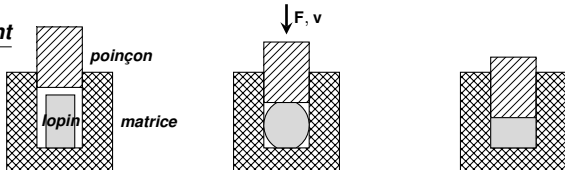


## 3.2.5 Procédés de forgeage avancé (suite)

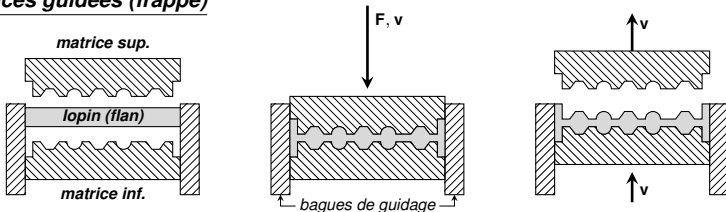
### Matriçage de précision

- *En matriçage de précision, le matériau ne s'écoule pas en dehors de la matrice.*
- *La finition est (presque) superflue mais le contrôle est plus difficile (vol. du lopin !).*

#### Poinçon coulissant



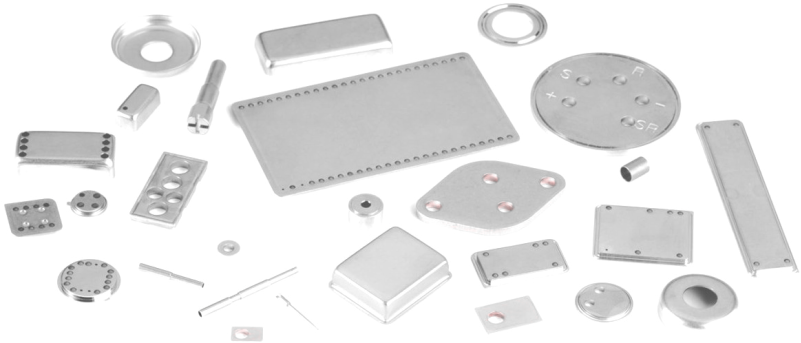
#### Matrices guidées (frappe)





## 3.2.6 Procédés de forgeage avancé (suite)

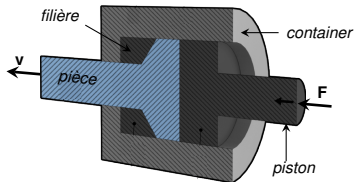
Matriçage de précision, exemple de pièces



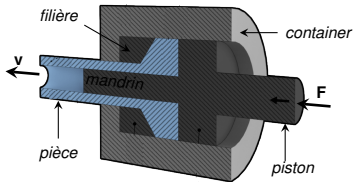
## 3.3.1 Extrusion

### Principe de l'extrusion

- *L'extrusion est un procédé dans lequel on produit une barre de section souhaitée en poussant le métal au travers d'une filière.*
- *La présence de contraintes de compression dans la direction d'extrusion est évidente. Elles se combinent à d'autres contraintes de compression exercées par la filière.*
- *L'extrusion peut se faire à chaud ou à froid. Généralement, les propriétés structurales et mécaniques obtenues en extrusion à froid sont meilleures.*
- *Un des avantages du procédé d'extrusion est l'économie de matière : peu ou pas de matière perdue.*



**Extrusion simple**



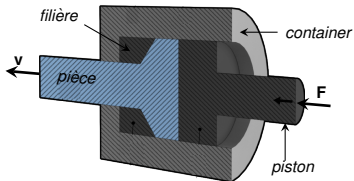
**Extrusion avec mandrin**

Source : Manufacturing guide

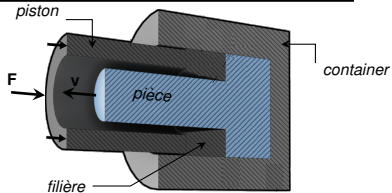
## 3.3.2 Extrusion directe et indirecte

On distingue les procédés d'extrusion directe et indirecte

- En **extrusion directe** :
  - la filière est fixée au container,
  - la pièce extrudée se déplace dans le sens de la force appliquée au piston.
- En **extrusion indirecte** :
  - la filière est fixée au piston,
  - la pièce extrudée se déplace dans le sens opposé à la force appliquée au piston,
  - pas de frottement entre la pièce et le container.



**Extrusion directe**



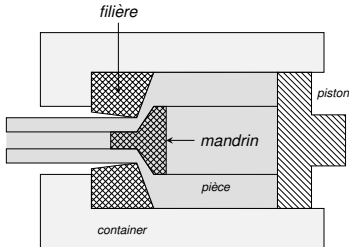
source : Manufacturing guide

**Extrusion indirecte**

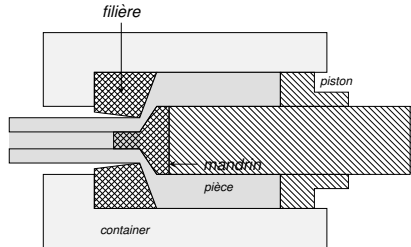
## 3.3.3 Extrusion de profilés tubulaires

### Utilisation de mandrins

- Des profilés tubulaires peuvent être extrudés au travers d'une filière qui donne la forme extérieure et d'un autre outil appelé mandrin et qui donne la forme intérieure.
- On distingue les solutions avec mandrin flottant qu'on installe dans un lopin tubulaire et celles avec mandrin fixe. Le mandrin fixe peut être utilisé pour percer le lopin dans le cas où celui-ci ne le serait pas au départ. Dans tous les cas et pour qu'on puisse le maintenir, le mandrin fixe doit être **plus long** que le lopin.



**Mandrin flottant**

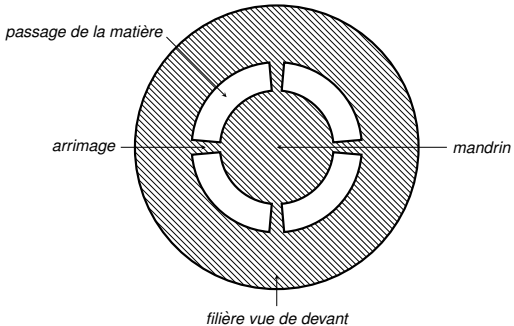


**Mandrin fixe**

## 3.3.4 Extrusion de profilés tubulaires (suite)

### Intégration du mandrin dans la filière

- *S'il est arrimé à la filière, le mandrin peut parvenir à percer le lopin.*
- *Dans un tel cas, les arrimages vont fendre la paroi de la pièce.*
- *Si l'extrusion se fait à chaud, la matière est en principe susceptible de se ressouder après la filière.*

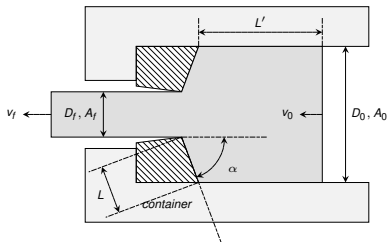


## 3.3.5 Extrusion - Nomenclature

### Schéma et nomenclature pour l'extrusion

Nom	Unité
$D_f$ : diamètre de sortie	mm
$D_0$ : diamètre d'entrée	mm
$A_f$ : section de sortie	mm <sup>2</sup>
$A_0$ : section d'entrée	mm <sup>2</sup>

Nom	Unité
$v_f$ : vitesse de sortie	mm/s
$v_0$ : vitesse d'entrée	mm/s
$L, L'$ : longueurs de contact	mm
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

- $L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$

- **Relations physiques**

- $v_f A_f = v_0 A_0$   
(incompressibilité)

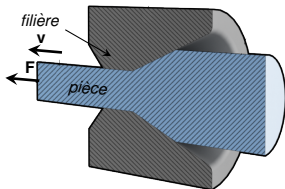
- **Rapport d'extrusion**

- $r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$

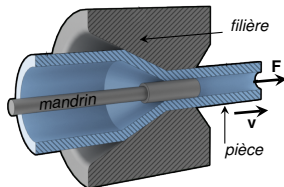
## 3.3.6 Tréfilage

### Principe du tréfilage

- Le tréfilage est un procédé dans lequel on modifie la section d'une barre métallique. La différence avec l'extrusion est que la matière est tirée (et non pas poussée) au travers de la filière. Celle-ci est abondamment lubrifiée.
- Le tréfilage peut se faire à chaud (au détriment des propriétés de la pièce).
- Une contrainte de traction se développe dans la direction de tréfilage (risque de **striction**) et se combine à une contrainte de compression exercée par la filière.
- En général, l'écroutissage obtenu après tréfilage est extrêmement important. Pour améliorer les propriétés plastiques des pièces tréfilées, des traitements thermiques sont généralement nécessaires (**patentage**) .



**Tréfilage simple**



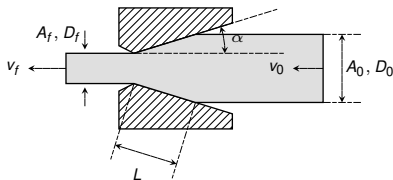
**Tréfilage avec mandrin**

## 3.3.7 Tréfilage - Nomenclature

### Schéma et nomenclature pour le tréfilage

<i>Nom</i>	<i>Unité</i>
$D_f$ : diamètre de sortie	mm
$D_0$ : diamètre d'entrée	mm
$A_f$ : section de sortie	mm <sup>2</sup>
$A_0$ : section d'entrée	mm <sup>2</sup>

<i>Nom</i>	<i>Unité</i>
$v_f$ : vitesse de sortie	mm/s
$v_0$ : vitesse d'entrée	mm/s
$L$ : longueur de contact	mm
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

- $L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$

- **Relations physiques**

- $v_f A_f = v_0 A_0$   
(incompressibilité)

- **Rapport de tréfilage**

- $r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$

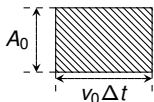


## 3.3.8 Extrusion et tréfilage

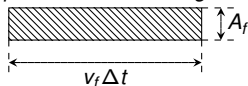
### Travail spécifique d'extrusion/tréfilage (matériau plastiquement idéal)

- Les opérations d'extrusion et de tréfilage consistent (essent.) en un étirage.

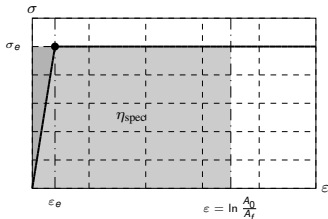
avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



- Le taux de déformation vaut  $\varepsilon = \ln \frac{v_f \Delta t}{v_0 \Delta t} = \ln \frac{v_f}{v_0} = \ln \frac{A_0}{A_f}$ .
- Le travail spécifique de **déformation** en extrusion/tréfilage est l'aire sur la courbe de traction réelle :



- Pour un corps **plastiquement idéal** :

$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

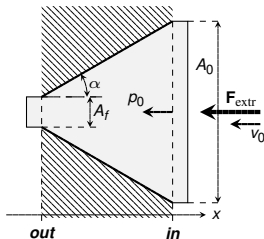
- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon = R_e \ln \frac{A_0}{A_f} = -R_e \ln r \quad (1)$$

Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

## 3.3.9 Pression et force d'extrusion

### Situation sans frottement



- On appelle  $p_0$  la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_0$ . La force d'extrusion est donc  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = p_0 A_0 v_0. \quad (2)$$

Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} A_0 v_0 \quad (3)$$

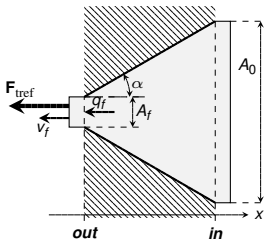
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport d'extrusion :

$$p_0 = -R_e \ln r \quad (\text{Pression d'extrusion}) \quad (4)$$

$$F_{\text{extr}} = -A_0 R_e \ln r \quad (\text{Force d'extrusion}) \quad (5)$$

## 3.3.10 Traction et force de tréfilage

### Situation sans frottement



- On appelle  $q_f$  la traction de tréfilage appliquée au flan en sortie. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_f$ . La force de tréfilage est donc  $F_{\text{tref}} = q_f A_f$ . La puissance de tréfilage vaut

$$P_{\text{tref}} = q_f A_f v_f. \quad (6)$$

Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} A_f v_f \quad (7)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent  $q_f = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport de tréfilage :

$$q_f = -R_e \ln r \quad (\text{Traction de tréfilage}) \quad (8)$$

$$F_{\text{tref}} = -A_f R_e \ln r \quad (\text{Force de tréfilage}) \quad (9)$$

### 3.3.11 Contraintes d'extrusion/tréfilage

#### Prise en compte des frottements

- Si des frottements de nature coulombienne (coefficient de frottement  $\mu$ ) entre le lopin et la filière doivent être pris en compte alors la formule (4) pour la pression d'extrusion doit être modifiée en conséquence :

$$p_0 = \begin{cases} R_e \left( 1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left( \frac{1 - r^{\mu \cot \alpha}}{r^{\mu \cot \alpha}} \right), & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad \text{(Press. d'extrusion)} \quad (10)$$

- Il en va de même de la traction de tréfilage (8) :

$$q_f = \begin{cases} R_e \left( 1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) (1 - r^{\mu \cot \alpha}), & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad \text{(Tract. de tréfilage)} \quad (11)$$

## 3.3.12 Bilan de l'extrusion et du tréfilage

### Forces et énergies spécifiques d'extrusion et de tréfilage

- Les forces d'extrusion et de tréfilage sont liées simplement à  $q_f$  et  $p_0$  :

$$F_{extr} = A_0 p_0 \quad \text{et} \quad F_{tréf.} = A_f q_f \quad (\text{Forces d'extrusion et de tréfilage}) \quad (12)$$

- Les puissances d'extrusion et de tréfilage s'obtiennent en multipliant les forces (12) par les vitesses avec lesquelles on les déplace :

$$P_{extr} = v_0 A_0 p_0 \quad \text{et} \quad P_{tréf.} = v_f A_f q_f \quad (\text{Puiss. d'extrusion et de tréfilage}) \quad (13)$$

- Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée, les facteurs  $p_0$  et  $q_f$  intervenant dans (13) s'interprètent comme les énergies spécifiques nécessaires à effectuer l'opération d'extrusion, respectivement de tréfilage.
- Si  $\mu > 0$ , les équations (10)-(11) montrent qu'à cond. ( $A_0, A_f, \alpha, \mu$ ) identiques l'extrusion d'un matériau demande plus d'énergie que son tréfilage :

$$p_0 > q_f \quad (14)$$

et comme  $A_0 > A_f$  il en va de même avec les forces (12) :  $F_{extr} \gg F_{tréf.}$ .

## 3.3.13 Bilan de l'extrusion et du tréfilage (suite)

### Energies et travail de déformation, condition de tréfilage

- On peut montrer que les énergies spécifiques d'extrusion  $p_0$  et de tréfilage  $q_f$  sont toutes les deux supérieures au travail spécifique de déformation  $\eta_{\text{spec}} = -R_e \ln r$  (1) :

$$p_0 > q_f > \eta_{\text{spec}}, \text{ si } \mu > 0. \quad (15)$$

*Cela signifie que l'énergie dépensée par les deux procédés n'est pas uniquement dissipée en déformation mais aussi sous forme de chaleur. Dans le cas où les frottements sont négligables ( $\mu = 0$ ), les inégalités (15) se transforment en égalité.*

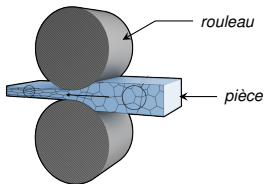
- Une perte de contact entre l'opin et filière est possible en tréfilage (mais pas en extrusion) si le rapport  $r$  est trop petit. La condition qui évite cette problématique est liée au coefficient de frottement  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :

$$r \geq \left( \frac{\frac{\tan \alpha}{\mu}}{\frac{\tan \alpha}{\mu} + 1} \right)^{\frac{\tan \alpha}{\mu}} \quad \text{(condition de tréfilage)} \quad (16)$$

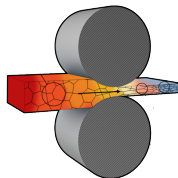
## 3.4.1 Laminage

### Principe

- *Le laminage est un procédé dans lequel on réduit l'épaisseur d'une pièce (généralement métallique) par **compression entre deux rouleaux**.*
- *Un laminoir permet la production de barres profilées et de feuilles.*
- *Dans la plupart des cas, le laminage se fait à chaud (au détriment de la précision et des états de surface).*
- *En principe, les pièces laminées à chaud comportent peu ou pas de contraintes résiduelles.*



**Laminage à froid**



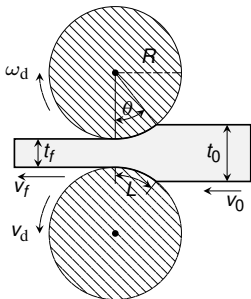
**Laminage à chaud**

## 3.4.2 Laminage

### Schéma et nomenclature

Nom	Unité
$t_f, w_f$ : épais./larg. de sortie	mm
$t_0, w_0$ : épais./larg. d'entrée	mm
$v_f, v_0$ : vitesse sortie/entrée	mm/s
$R$ : rayon du rouleau	mm

Nom	Unité
$\omega_d$ : vitesse ang. du rouleau	rad/s
$v_d$ : vitesse du rouleau	mm/s
$\theta$ : angle de contact	rad
$L$ : longueur de contact	mm



#### • Relations géométriques

- $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
- $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
- $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$

#### • Relations physiques

- $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
- En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )

#### • Rétréc., facteur de laminage

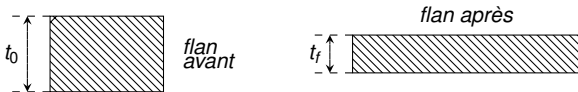
- $\delta = t_0 - t_f$
- $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$



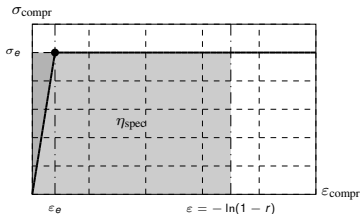
## 3.4.3 Laminage

### Travail spécifique de laminage

- La déformation induite par le laminage est essentiellement une compression.



- Le taux de compression réel vaut  $\varepsilon = \ln \frac{t_0}{t_f} = \ln \frac{1}{1-r} = -\ln(1-r)$ .
- Le travail spécifique de **déformation** en laminage est l'aire sous la courbe de compression réelle.



- Pour un matériau **plastiquement idéal** :

$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon = -R_e \ln(1-r) \quad (17)$$

Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

## 3.4.4 Laminage

### Condition de laminage, colline de pression

- *Contrairement à ce qui se passe en extrusion ou en tréfilage, le lopin n'est ni poussé à l'entrée ni tiré à la sortie en laminage. Le lopin avance dans le laminoire à cause des forces de frottements au niveau des rouleaux. Il est donc nécessaire que le coefficient de frottement coulombien  $\mu$  soit suffisant, sinon les rouleaux patinent et le lopin n'avance pas.*

*La condition qui assure que le laminage fonctionne fait intervenir le rayon des rouleaux et le rétrécissement  $\delta = t_0 - t_f$  :*

$$\mu^2 R \geq \frac{1}{4} \delta \quad (\text{Condition de laminage}) \quad (18)$$

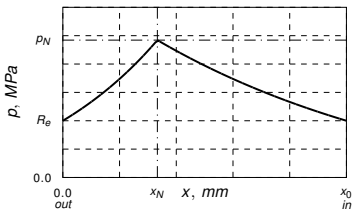


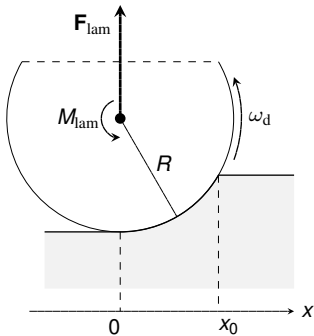
Fig. La colline de pression

- *Les rouleaux exercent en outre une pression  $p$  sur le flan. Elle est égale à la limite élastique du lopin en entrée et en sortie et maximale à la hauteur d'une abscisse  $x_N$  appelé point neutre.*

## 3.4.5 Laminage

### Force et moment de laminage

- Les axes des rouleaux subissent un effort radial appelé force de laminage notée  $F_{\text{lam}}$ . Cette force provoque une flexion des arbres.
- On appelle moment de laminage et on note  $M_{\text{lam}}$  le moment que le moteur doit exercer sur chaque rouleau pour les faire tourner.



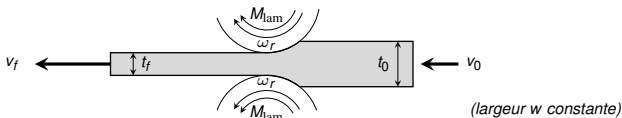
- Les formules suivantes permettent d'estimer ces quantités :

$$F_{\text{lam}} \simeq w R_e \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (19)$$

$$M_{\text{lam}} \simeq \frac{1}{2} w R_e R (t_0 - t_f) \quad (20)$$

## 3.4.6 Laminage

### Vitesse de laminage



- La vitesse circonférentielle des rouleaux  $v_d$  est liée à leur vitesse de rotation  $\omega_d$  :

$$v_d = \omega_d R. \quad (21)$$

- Les vitesses d'entrée  $v_0$  et de sortie  $v_f$  sont liées à la vitesse circonférentielle des rouleaux et au facteur de laminage  $r = \frac{t_0 - t_f}{t_0}$  :

$$v_0 = -\frac{r}{\ln(1-r)} v_d \quad \text{(vitesse d'entrée)} \quad (22)$$

$$v_f = -\frac{r}{(1-r)\ln(1-r)} v_d \quad \text{(vitesse de sortie)} \quad (23)$$

- On remarquera que  $v_0 < v_d < v_f$ . En général, on observe que le lopin a la même vitesse que les rouleaux lorsqu'il passe au niveau du point neutre  $x_N$  (cf. trsprt. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

## 3.4.7 Laminage

### Défauts en laminage

**Ondulations**



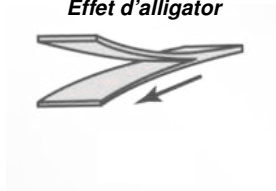
**Fissures de surface**



**Fissures de côté**



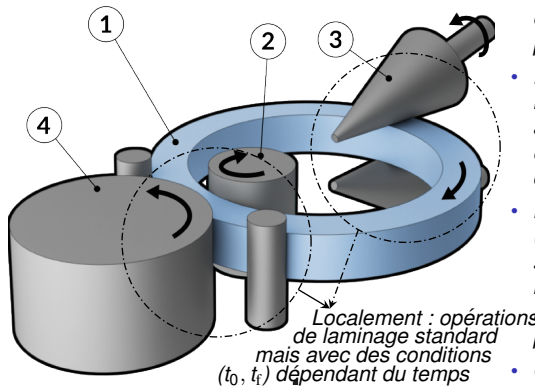
**Effet d'alligator**



## 3.4.8 Procédés de laminage avancés

### Laminage en tournant (*ring rolling*)

source : Manufacturing guide

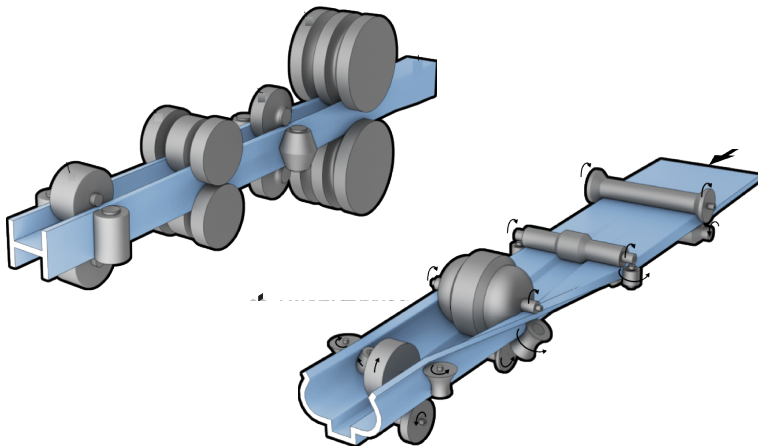


- Dans ce procédé, l'ébauche (1) est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un appui interne (2), un appui externe (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) reculent de sorte à augmenter le diamètre interne de la pièce tout en réduisant son épaisseur périphérique.
- Globalement, le volume de la pièce est maintenu.

## 3.4.9 Procédés de laminage avancés (suite)

### Laminage de profilés (*roll forming*)

source : Manufacturing guide



## Deuxième partie

5. Pliage

6. Emboutissage

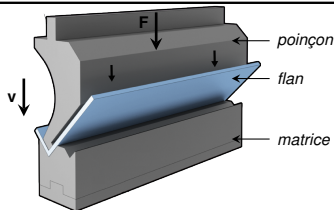
7. Découpage (poinçonnage)



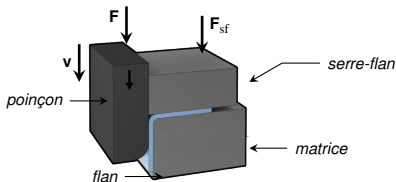
## 3.5.1 Pliage

### Principe

- En pliage, on déforme une feuille en la courbant autour d'un axe **rectiligne**.
- La partie inférieure de la feuille (opposée au piston) est sollicitée en traction, la partie supérieure est sollicitée en compression. La frontière entre la zone étirée et la zone comprimée est appelée **surface neutre**.
- Les contraintes de traction et de compression impliquées en pliage dépassent les limites élastiques sauf dans un voisinage de la surface neutre.
- On distingue le pliage en V (entre un poinçon et une matrice en V) et le pliage en coin (un seul pli réalisé entre deux surfaces planes).



**Pliage en V**



source : Manufacturing guide

**Pliage en coin**

## 3.5.2 Pliage

### Nomenclature

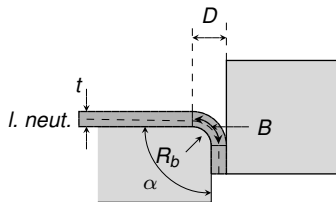
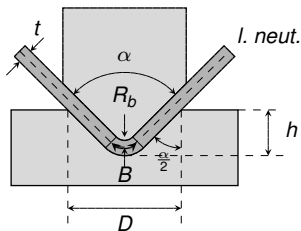
Nom	Unité
$\alpha$ : angle de pliage	rad
$R_b$ : rayon de pliage	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm

Nom	Unité
$D$ : ouverture d'outil	mm
$t$ : épaisseur du flan	mm
$h$ : profondeur de pliage	mm
$B$ : réserve de pliage	mm

•**N.B** :  $B$  est la longueur du **pli** (=partie courbée)

•**Relations géométriques** :  $B = (\pi - \alpha) \left( R_b + \frac{1}{2} t \right)$ ;  $h = \frac{D}{2} \cot \frac{\alpha}{2}$  (pl. en V)

Schéma (pliage en V (angle qlqç.) à g. et pliage en coin (angle de 90°) à dr.)



(cf. Annexe 7)

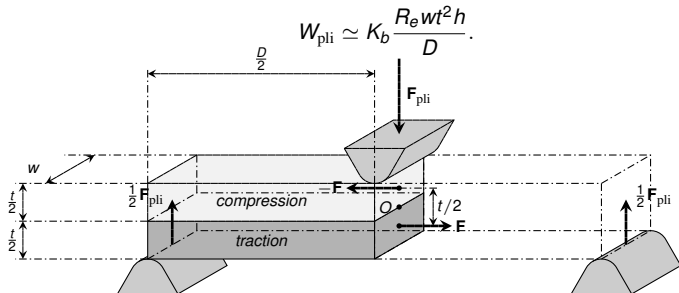
## 3.5.3 Pliage

### Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La force de pliage  $F_{pli}$  est la force verticale qui appuie sur le poinçon.
- Au niveau du premier point de contact (poinçon-flan), la force met les fibres supérieures à la surf. neutre en compression et les fibres inférieures en traction. Pour que le niveau de contrainte atteigne la lim. élastique  $R_e$  du mat. , il faut que

$$F_{pli} \simeq \frac{R_e w t^2}{D} \quad (\text{cas gén} : F_{pli} \simeq K_b \frac{R_e w t^2}{D}, K_b : \text{facteur de corr.})$$

- Le travail de pliage fait intervenir la course du poinçon  $\simeq$  prof. de pliage  $h$  :

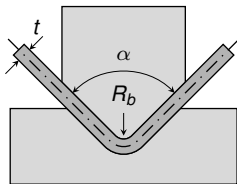


## 3.5.4 Pliage

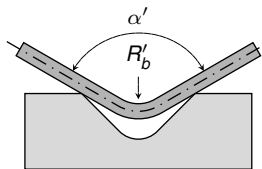
### Rebond élastique (cas du pliage en V)

- Lors du retrait du poinçon, l'angle de pliage a tendance à s'ouvrir :  $\alpha \rightarrow \alpha' > \alpha$  :
  - Les fibres allongées ont tendance à se retirer (retrait élastique),
  - Les fibres comprimées ont tendance à s'allonger (expansion élastique).
- Dans le cas d'un pliage en V et sous les hypothèses que
  - le matériau a un **comportement plastique idéal**,
  - la feuille déformée se comporte comme une **plaque mince**,
 on peut relier l'ouverture rel. de l'angle au taux de déf. réel en limite élastique  $\varepsilon_e$  :

$$\alpha' \approx \alpha + 3\varepsilon_e \left( \frac{1}{2} + \frac{R_b}{t} \right) (\pi - \alpha).$$



Avant relaxation



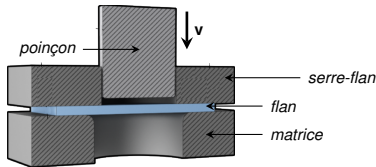
Après relaxation

Pas de pli donc pas de rebond si  $\alpha = 180^\circ$

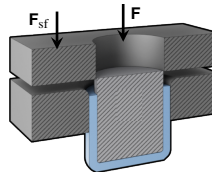
## 3.6.1 Emboutissage

### Principe

- *L'emboutissage est le procédé utilisé pour fabriquer à partir de feuilles des pièces de forme trop complexes pour être réalisées par pliage (e.g. les pièces de surface non développable). La pièce est formée entre un poinçon et une matrice.*
- *En début de processus, la feuille se trouve dans un état de contrainte proche de la situation de pliage (compression des fibres internes, traction des fibres externes). En milieu de processus, le matériau est essentiellement étiré avant d'être comprimé en toute fin d'opération.*
- *Le contrôle des propriétés tribologiques des interfaces entre le flan, le serre-flan et la matrice est primordial.*



**Début de l'opération**



source : Manufacturing guide

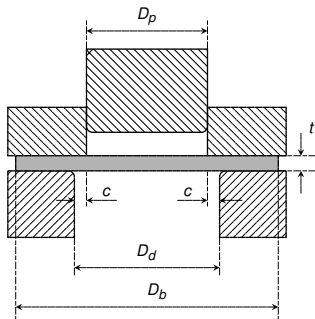
**Fin de l'opération**

## 3.6.2 Emboutissage

### Schéma et nomenclature

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$D_p$ : diamètre du poinçon	mm
$D_d$ : diamètre de la matrice	mm
$D_b$ : diamètre du flan	mm

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$c$ : dépouille	mm
$t$ : épaisseur du flan	mm



- **Relations géométriques**

$$c = \frac{D_d - D_p}{2}$$

## 3.6.3 Emboutissage

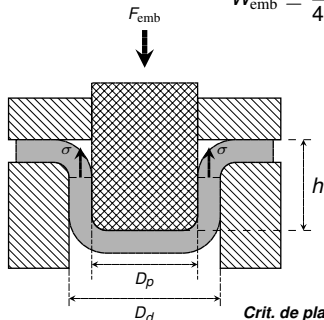
### Force et travail d'emboutissage

- La force d'emboutissage  $F_{emb}$  est la force verticale qui appuie sur le poinçon. Si on néglige les frottements (flan-serre flan et flan-matrice) et on considère que l'état de contr. du matériau dans la matrice est une pure traction plastique :

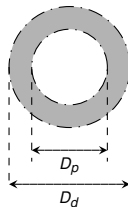
$$F_{emb} \simeq \frac{1}{4} \pi (D_d^2 - D_p^2) R_e$$

- Le travail d'emboutissage  $W_{emb}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :

$$W_{emb} \simeq \frac{1}{4} \pi (D_d^2 - D_p^2) R_e h$$



Pièce emboutie (vue de dessus)



**Crit. de plast :**  $\sigma = \sigma_e \simeq R_e$

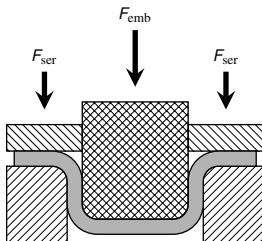
## 3.6.4 Emboutissage

### Force de serrage

- La force qu'on utilise pour presser le serre-flan sur la matrice est appelée force de serrage et notée  $F_{\text{ser}}$ .
- La force de serrage est fixée à hauteur d'une fraction de la force d'emboutissage :

$$F_{\text{ser}} \simeq \eta F_{\text{emb}}$$

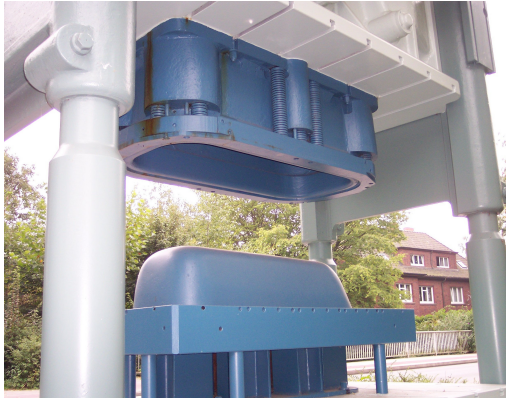
- Un choix typique est  $\eta = 30\%$ .
  - Une force de serrage trop forte peut provoquer des **fissurations** de la pièce.
  - Une force de serrage trop faible risque de conduire à des **ondulations**.





## 3.6.5 Emboutissage

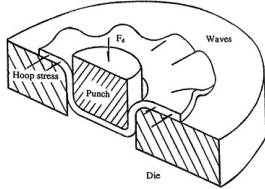
Exemple de pièces



## 3.6.6 Emboutissage

### Défauts en emboutissage

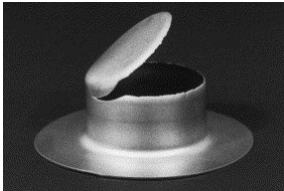
**Ondulations**



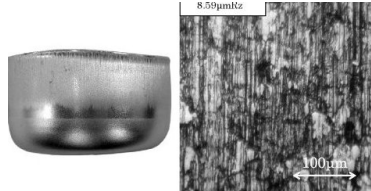
**Effets d'oreille**



**Fissures**



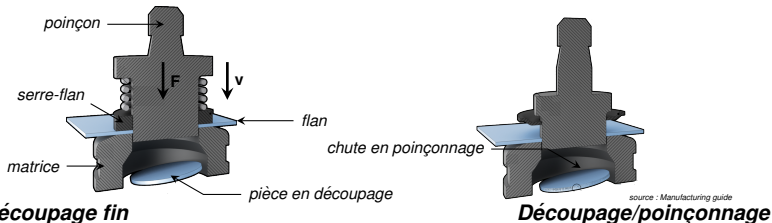
**Rayures**



## 3.7.1 Découpage-poinçonnage

### Principe

- En découpage, on engendre des contraintes de cisaillement allant au-delà de la résistance du matériau pour provoquer sa rupture.
- Pour favoriser l'apparition nette de contraintes de cisaillement, il est important que les arêtes du poinçon et de la matrice soient affûtées.
- Avant de provoquer sa rupture, le poinçon comprime plastiquement le flan (**phase de compression**) avant d'y pénétrer (**phase de pénétration**).
- On parle de découpage ou de poinçonnage suivant que la pièce est la chute ou, respectivement, le flan.

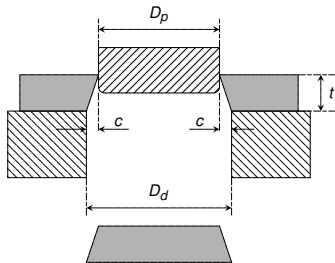


## 3.7.2 Découpage-poinçonnage

### Schéma et nomenclature

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$D_p$ : diamètre du poinçon	mm
$D_d$ : diamètre de la matrice	mm

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$c$ : dépouille	mm
$t$ : épaisseur du flan	mm



- **Relations géométriques**

$$c = \frac{D_d - D_p}{2}$$

## 3.7.3 Découpage-poinçonnage

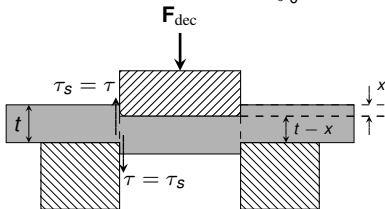
### Force et travail de découpage

- La force de découpage  $F_{\text{dec}}$  est la force verticale qui appuie sur le poinçon.
- Cette force engendre un cisaillement sur le pourtour  $L$  de la pièce à découper. Pour que le niveau de contrainte atteigne la résistance au cisaillement  $\tau_s$  du matériau, il faut que

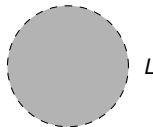
$$F_{\text{dec}} \simeq \tau_s L(t - x), \quad \text{avec } x : \text{prof. découpée et } L : \text{pourtour de découpe}$$

- On calcule le travail de déc.  $W_{\text{dec}}$  en intégrant la force  $F_{\text{dec}}$  contre son dépl. :

$$W_{\text{dec}} \simeq \int_0^t \tau_s L(t - x) dx = \frac{1}{2} \tau_s L t^2$$



Pièce découpée (vue de dessus)



## 3.7.4 Pliage, emboutissage et découpage progressif

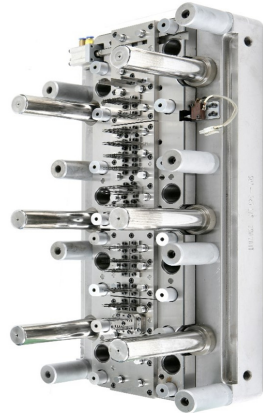
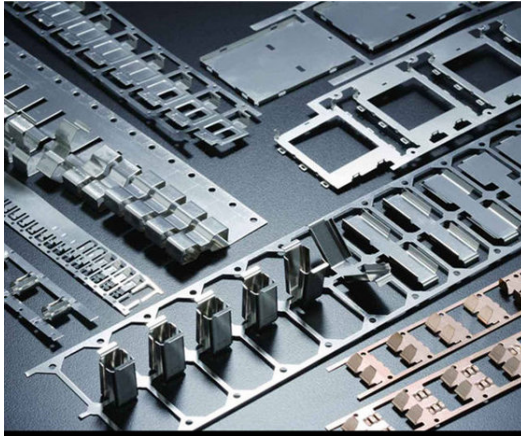
### Exemple de pièces



*courtesy : Manufacturing Guide*

## 3.7.5 Pliage, emboutissage et découpage progressif

Exemple de pièces (suite)



*courtesy : Manufacturing Guide*

# ***ANNEXES, TABLES ET BIBLIOGRAPHIE***



# A 1: Terminologie anglaise

## Principaux procédés de formage

<b>Français</b>	<b>Anglais</b>
<i>Découpage</i> : .....	<i>Blanking</i>
<i>Emboutissage</i> : .....	<i>Deep drawing</i>
<i>Etampage</i> : .....	<i>Stamping</i>
<i>Extrusion</i> : .....	<i>Extrusion</i>
<i>Forgeage</i> : .....	<i>Forging</i>
<i>Laminage</i> : .....	<i>Rolling</i>
<i>Matriçage</i> : .....	<i>Impression-die forging, coining</i>
<i>Frappe</i> : .....	<i>Coining</i>
<i>Pliage</i> : .....	<i>Bending</i>
<i>Poinçonnage</i> : .....	<i>Punching</i>
<i>Tréfilage</i> : .....	<i>Drawing</i>

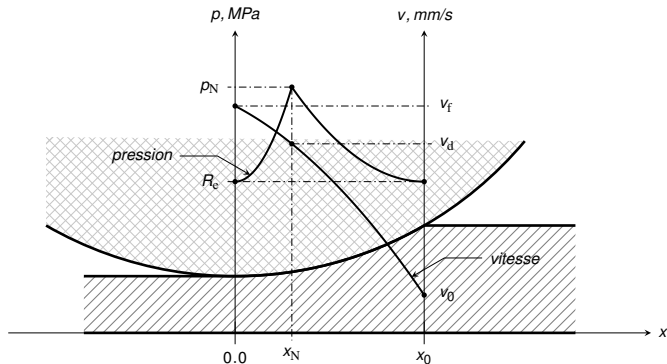
## A 2: Terminologie anglaise

### Concepts associés aux principaux procédés de formage

<b>Français</b>	<b>Anglais</b>
<i>Laminoir</i> :.....	<i>Rolling mill</i>
<i>Matrice, filière</i> :.....	<i>Die</i>
<i>Poinçon</i> :.....	<i>Punch</i>
<i>Dépouille</i> :.....	<i>Clearance</i>
<i>Flan</i> :.....	<i>Blank</i>
<i>Serre-flan</i> :.....	<i>Blankholder</i>
<i>Forgé (par opposition à coulé)</i> :.....	<i>Wrought (versus cast)</i>

## A 3: Théorie du point neutre en laminage

Colline de pression et vitesses de laminage



## A 4: Modèle de frottements Coulombien

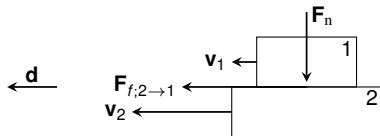
### Expression de la force de frottement

- La force de frottement qu'un corps mobile (No 2) applique sur un autre corps mobile (No 1) en contact est proportionnelle à la force d'appui  $F_n$

$$\mathbf{F}_{f;2 \rightarrow 1} = \mu F_n \mathbf{d} \quad \mathbf{d} : \text{direction unité, } \mu F_n : \text{amplitude de la force de frott.}$$

- Dans cette relation,  $\mu$  est le coefficient de **frottement dynamique** et la direction unité  $\mathbf{d}$  est celle de la vitesse relative  $\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$  du corps 2 (agissant) par rapport au corps 1 (subissant) :

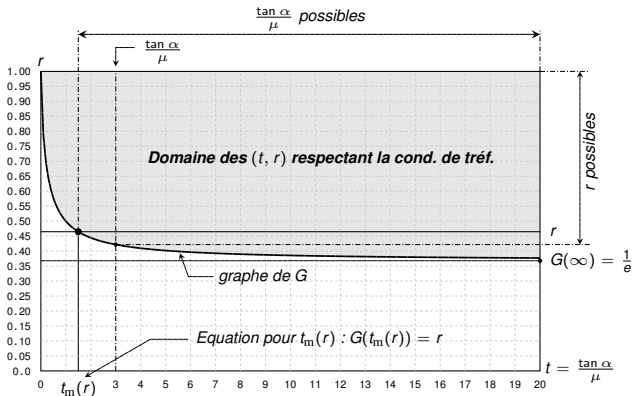
$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{\|\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1\|}$$



## A 5: Condition de tréfilage

### Forme primitive et représentation graphique

- Borne sur le plus petit rapport possible :  $r \geq G\left(\frac{\tan \alpha}{\mu}\right)$  où  $G(t) = \left(\frac{t}{1+t}\right)^t$



- Borne sur le plus petit angle d'ouverture :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu)$   
avec  $\alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

## A 6: Condition de tréfilage (suite)

### Equation pour $\alpha_m(r, \mu)$

- *Le demi-angle d'ouverture minimal  $\alpha_m(r, \mu)$  pour un rapport de tréfilage  $r$  et un coefficient de frottement  $\mu$  donné vaut*

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r) \quad (24)$$

où  $t_m(r)$  est la solution  $t$  de l'équation transcendante  $G(t) = r$

### Algorithme de calcul

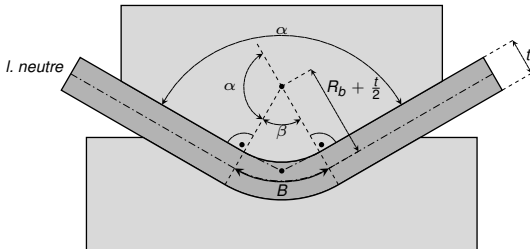
- *On propose de résoudre l'équation  $G(t) = r$  en posant  $t_0 = -\frac{\ln r}{1+\ln r}$  puis en appliquant l'algorithme itératif*

$$t_{m+1} = \frac{\ln r}{\ln \frac{t_m}{1+t_m}}, \quad m = 0, 1, 2 \dots$$

*Cet algorithme converge vers  $t = t_m(r)$ .*

## A 7: Réserve de pliage

### Situation schématique



- On observe que :

$$B = \beta \left( R_b + \frac{t}{2} \right)$$

- Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  ont des cotés perpendiculaires deux à deux. Ils ne sont pas égaux mais complémentaires à  $\pi$  :  $\beta + \alpha = \pi$  soit  $\beta = \pi - \alpha$ . Ainsi a-t-on

$$B = (\pi - \alpha) \left( R_b + \frac{t}{2} \right)$$

## A 8: Calcul de la force de pliage

- La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  engendre un couple de force  $\mathbf{F} - \mathbf{F}$  sur la section droite. L'équilibre des moments sur la partie gauche (par rapp. à  $O$ ) lie  $F_{\text{pli}}$  à  $F$  :

$$-\frac{1}{2}F_{\text{pli}}\frac{1}{2}D + F\frac{t}{2} = 0 \implies F = \frac{1}{2}F_{\text{pli}}\frac{D}{t}.$$

- La contrainte de traction/compression sur la section dr. se déduit ensuite de  $F_{\text{pli}}$

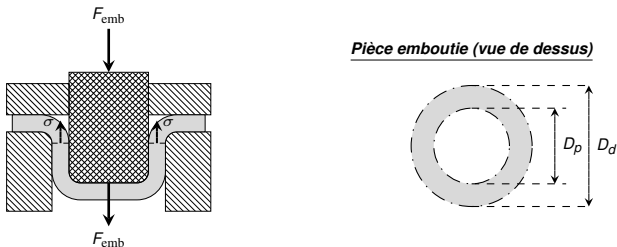
$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w\frac{t}{2}} = \frac{F_{\text{pli}}D}{wt^2}$$

- Il faut que  $F_{\text{pli}}$  soit suffisante pour plastifier le matériau

$$\bar{\sigma} \simeq R_e \implies F_{\text{pli}} = R_e \frac{wt^2}{D}$$



## A 9: Calcul de la force d'emboutissage



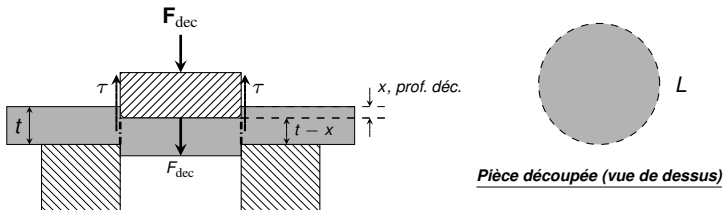
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}} + \frac{\pi}{4}(D_d^2 - D_p^2)\sigma = 0 \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}(D_d^2 - D_p^2)\sigma$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_e \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}R_e(D_d^2 - D_p^2)$$

## A 10: Calcul de la force de découpage



- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

$$-F_{dec} + \tau L(t - x) = 0 \implies F_{dec} = \tau L(t - x)$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S \implies F_{dec} = \tau_S L(t - x)$$

## A 11: Bibliographie pour le chapitre 3



B. Avitzur.

Metal forming : processes and analysis, volume 10.  
McGraw-Hill New York, 1968.



T.G. Byrer, S.L. Semiatin, and D.C. Vollmer.

Forging handbook.  
Forging Industry Association, 1985.



M.P. Grover and M.P. Groover.

Fundamentals of modern manufacturing : Materials, processes, and systems, 1995.



R. Hill.

The mathematical theory of plasticity.  
Oxford : Clarendon Press, 1950.



Kalpakjian.

Manufacturing Engineering and Technology.  
Addison-Wesley, New York, 1995.



K. Laue and H. Stenger.

Extrusion : processes, machinery, tooling.  
American Society for Metals, 1981., page 457, 1981.



R.H. Wagoner and J.L. Chenot.

fundamentals of metal forming.  
Wiley, 1997.