Procédés de Fabrication I - IGI
Chapitre 3. Formage des métaux

4 novembre 2026

Première partie

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

3.1.1 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 Classification des procédés de formage

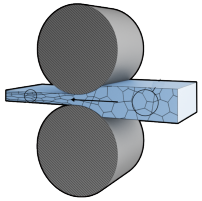
- *On distingue les procédés de formage selon qu'ils s'appliquent à des feuilles ou à des pièces massives :*

Procédés de formage

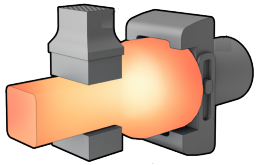
Pièces massives	***Feuilles***
Laminage	***Pliage***
Forgeage	***Emboutissage***
Martelage, pressage	
Matriçage, forgeage libre	
Extrusion	***Découpage***
	Poinçonnage
Tréfilage	

(cf. Annexes 1, 2, 11)

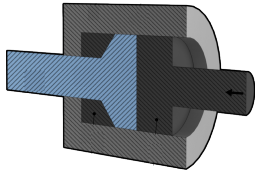
3.1.3 Techniques de formage - pièces massives



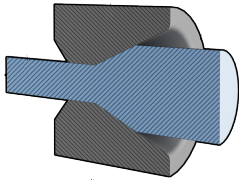
laminage



forgeage (matriçage)



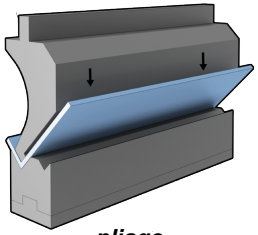
extrusion



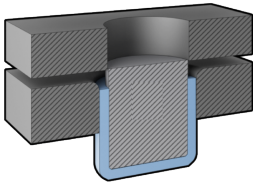
tréfilage

source : Manufacturing guide

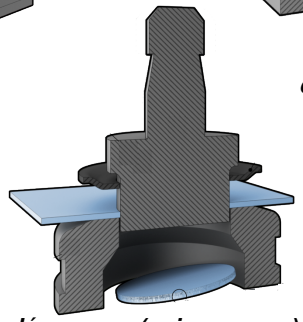
3.1.4 Techniques de formage - feuilles



pliage



emboutissage



découpage (poinçonnage)

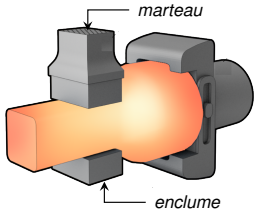
source : Manufacturing guide

3.1.5 Formage - quelques adresses en Suisse

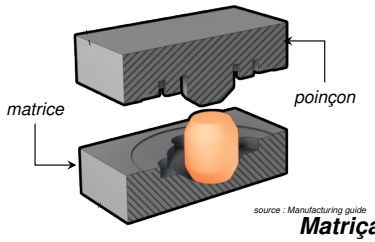
Laminage	Lamineries MATTHEY SA	***Lamineries Matthey SA*** *Rte de Neuchâtel 6* *CH-2520 La Neuveville*
Emboutissage/matriçage	MF	***Meylan Frères SA*** *Rte du Planoz 31* *CH-1348 Le Brassus*
Emboutissage/matriçage	R	***Rihs AG*** *Grenchenstrasse 52* *CH-2544 Bettlach*
Découpage fin	FEINTOOL	***Feintool AG*** *Industriering 8* *CH-3250 Lyss*
Extrusion	Constellium	***Constellium Valais SA*** *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).*



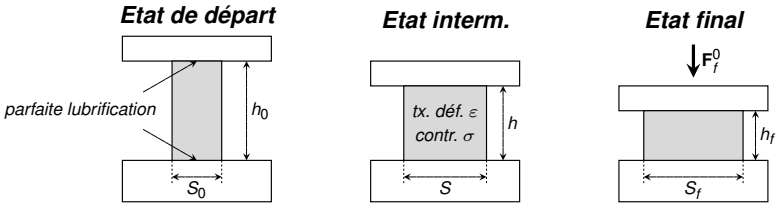
Forgeage libre



source : Manufacturing guide

Matriçage

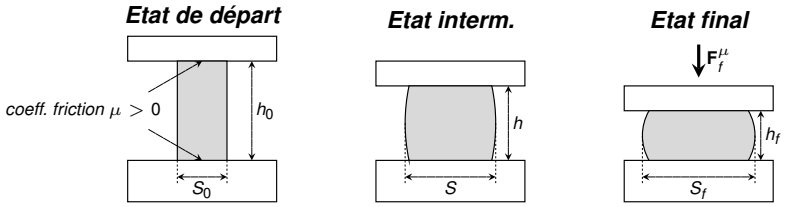
3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)



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* σ *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 libre - force (avec frott.)



Le frottement entre lopin et matrice est prise en compte

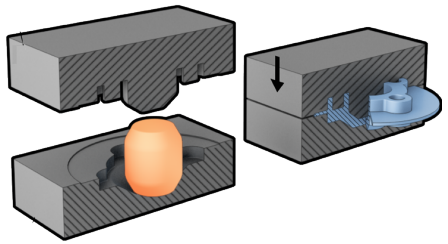
- *Dans ce cas, l'état de contrainte n'est plus une* ***compression uniforme****.*
- *Différents modèles permettent d'étudier cet état de contrainte (lignes de gliss.).*
- *Le résultat est que la force de forgeage avec frottement est une correction de la force de forgeage sans frottement :*

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

$C \simeq 0.45$ *pour une section circulaire.*

3.2.4 Procédés de forgeage avancé -matriçage

- *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.*

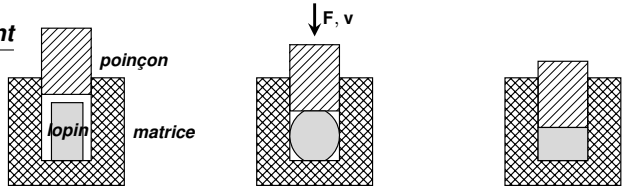




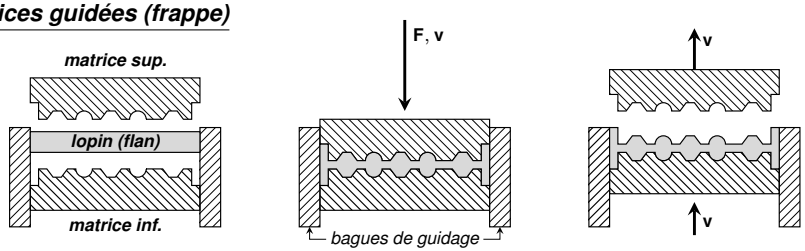
3.2.5 Forgeage avancé - matriçage de précision

- *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 !).*

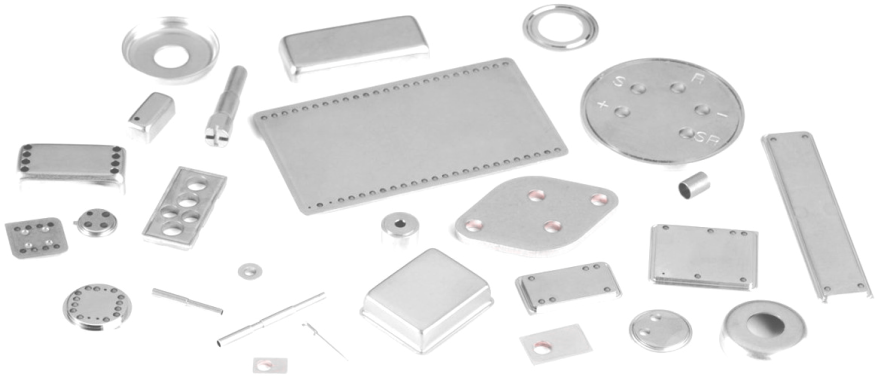
Poinçon coulissant



Matrices guidées (frappe)

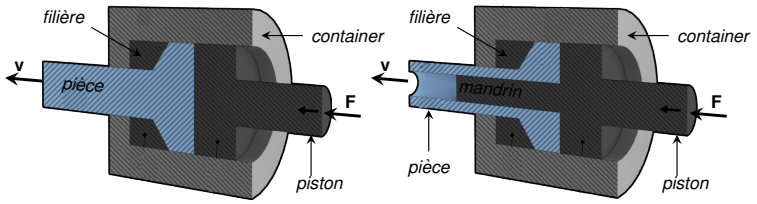


3.2.6 Matriçage de précision, exemple de pièces



3.3.1 Extrusion - principe

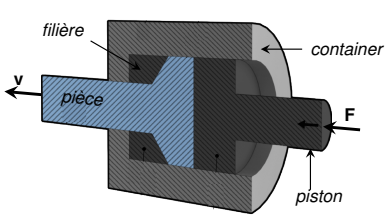
- *L'extrusion est un procédé dans lequel on produit une barre de section souhaitée en poussant le métal au travers d'une filière.*
- *La présence de contraintes de compression dans la direction d'extrusion est évidente. Elles se combinent à d'autres contraintes de compression exercées par la filière.*
- *L'extrusion peut se faire à chaud ou à froid. Généralement, les propriétés structurelles 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.*



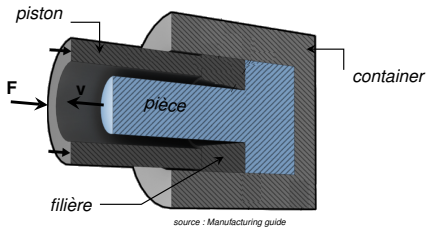
Extrusion simple ***Extrusion avec mandrin***

3.3.2 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.*



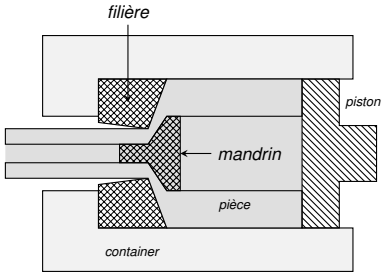
Extrusion directe



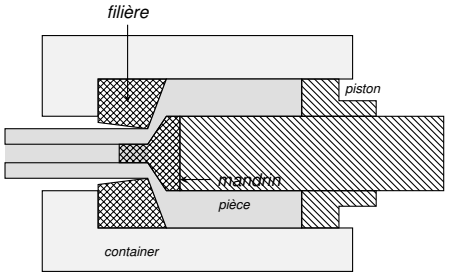
Extrusion indirecte

3.3.3 Extrusion de profilés tubulaires

- *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.*



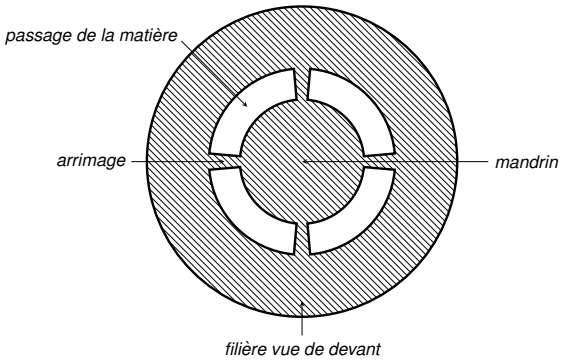
Mandrin flottant



Mandrin fixe

3.3.4 Intégration du mandrin

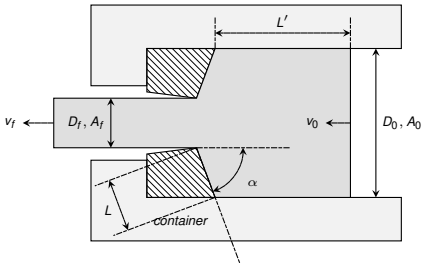
- *S'il est arrimé à la filière, le mandrin peut parvenir à percer le lopin.*
- *Dans un tel cas, les arrimages vont fendre la paroi de la pièce.*
- *Si l'extrusion se fait à chaud, la matière est en principe susceptible de se ressouder après la filière.*



3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm^2
A_0 : section d'entrée	mm^2

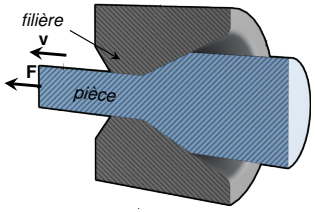
Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L, L' : longueurs de contact	mm
α : ½ angle d'ouverture	rad



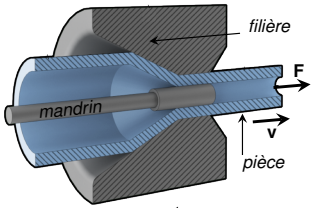
- ***Relations géométriques***
  - $L = \frac{D_0 - D_f}{2 \sin \alpha}$
- ***Relations physiques***
  - $v_f A_f = v_0 A_0$ *(incompressibilité)*
- ***Rapport d'extrusion***
  - $r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$

3.3.6 Tréfilage - principe

- *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'écrouissage obtenu après tréfilage est extrêmement important. Pour améliorer les propriétés plastiques des pièces tréfilées, des traitement thermiques sont généralement nécessaires (**patentage**) .*



Tréfilage simple

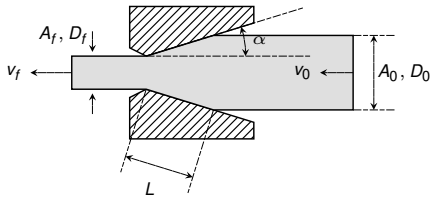


Tréfilage avec mandrin

3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

Nom	Unité
D_f : diamètre de sortie	mm
D_0 : diamètre d'entrée	mm
A_f : section de sortie	mm^2
A_0 : section d'entrée	mm^2

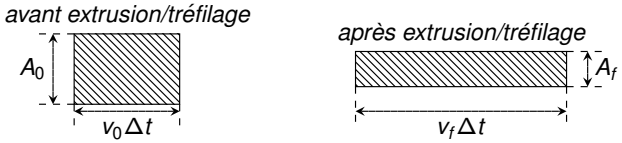
Nom	Unité
v_f : vitesse de sortie	mm/s
v_0 : vitesse d'entrée	mm/s
L : longueur de contact	mm
α : ½ angle d'ouverture	rad



- ***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

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



- *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 :*

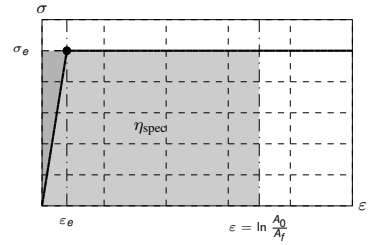


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- *Pour un corps* ***plastiquement idéal*** *:*

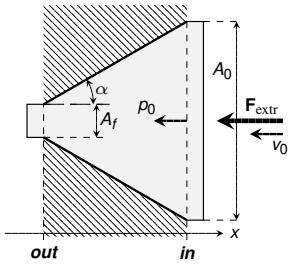
$$\eta_{spec} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2}\sigma_e \varepsilon_e$$

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

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

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* $F_{extr} = p_0 A_0$*. La puissance d'extrusion vaut*

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

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

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

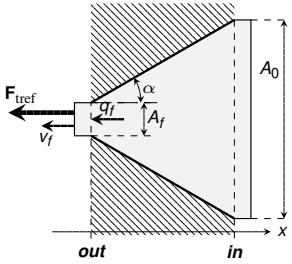
avec η_{spec} *le travail spécifique de déformation (1) et* $A_0 v_0$ *le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent* $p_0 = \eta_{spec}$ *soit avec* $r = \frac{A_f}{A_0}$*, le rapport d'extrusion :*

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

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

3.3.10 Traction et force de tréfilage

Situation sans frottement



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

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

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

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

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

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

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

3.3.11 Contraintes d'extrusion/tréfilage

Prise en compte des frottements

- *Si des frottements de nature coulombienne (coefficient de frottement* μ*) 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 :*

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

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

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

(cf. Annexe 3)

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 :*

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

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

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

- *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, α, μ) identiques l'extrusion d'un matériau demande plus d'énergie que son tréfilage :*

$$p_0 > q_f \tag{14}$$

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 $\eta_{spec} = -R_e \ln r$ (1) :*

$$p_0 > q_f > \eta_{spec}, \ si\ \mu > 0. \tag{15}$$

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

- *En tréfilage, il faut éviter que la traction de tréfilage (une traction) passe au-dessus de la limite élastique du matériau. Si $q_f > R_e$ alors un phénomène de striction apparaît qui conduit à une perte de contact entre le lopin et la filière. La condition qui évite ce problème est liée au coefficient de frottement μ et au demi-angle d'ouverture α :*

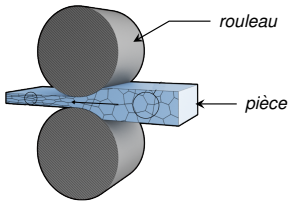
$$r \geq \left(\frac{t}{1+t}\right)^t \quad avec \quad t = \frac{\tan\alpha}{\mu} \quad \textbf{(condition de tréfilage)} \tag{16}$$

- *En extrusion, la matière n'est pas étirée depuis l'avant mais comprimée depuis l'arrière. Il ne peut donc pas y avoir de perte de contact entre le lopin et la filière et **aucune condition** ne limite les rapports d'extrusion possibles.*

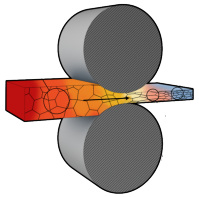
(cf. Annexes 4, 5)

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

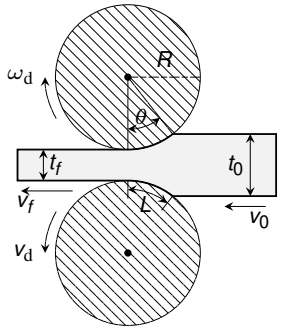


Laminage à chaud

3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

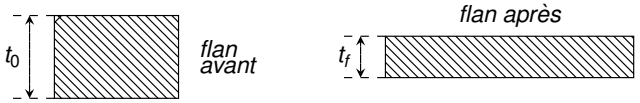
Nom	Unité
ω_d : vitesse ang. du rouleau	rad/s
v_d : vitesse du rouleau	mm/s
θ : angle de contact	rad
L : longueur de contact	mm



- ***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., θ est petit ($< 20°$)*
- ***Rétrec., 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

- *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.*

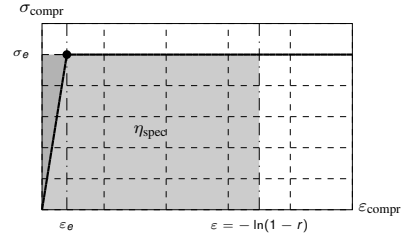


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

- *Pour un matériau* ***plastiquement idéal*** *:*

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

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

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

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* μ *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 rétrecissement* $\delta = t_0 - t_f$ *:*

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

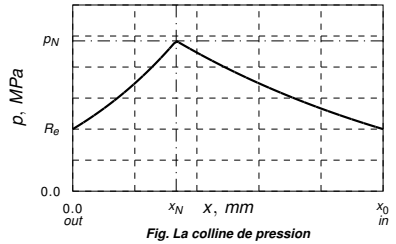


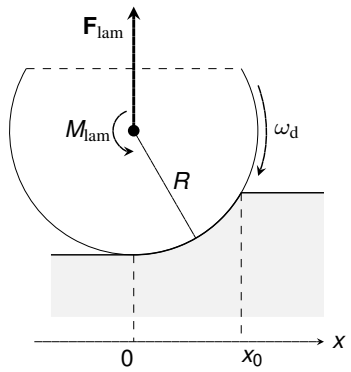
Fig. La colline de pression

- *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'un 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_{lam}*. Cette force provoque une flexion des arbres.*
- *On appelle moment de laminage et on note* M_{lam} *le moment que le moteur doit exercer sur chaque rouleau pour les faire tourner.*



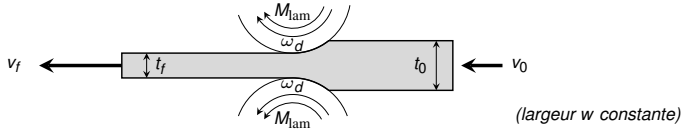
- *Les formules suivantes permettent d'estimer ces quantités :*

$$F_{lam} \simeq wR_e\sqrt{R(t_0 - t_f)} \qquad (19)$$

$$M_{lam} \simeq \frac{1}{2} wR_e R(t_0 - t_f) \qquad (20)$$

3.4.6 Laminage

Vitesse de laminage



- *La vitesse circonférentielle des rouleaux* v_d *est liée à leur vitesse de rotation* ω_d *:*

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

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

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

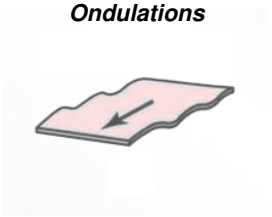
$$v_f = -\frac{r}{(1-r)\ln(1-r)} v_d \quad \textbf{(vitesse de sortie)} \qquad (23)$$

- *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) :* $v_N = v_d$*.*

(cf. Annexe 6)

3.4.7 Laminage - défauts

Ondulations



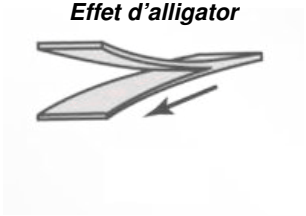
Fissures de surface



Fissures de côté

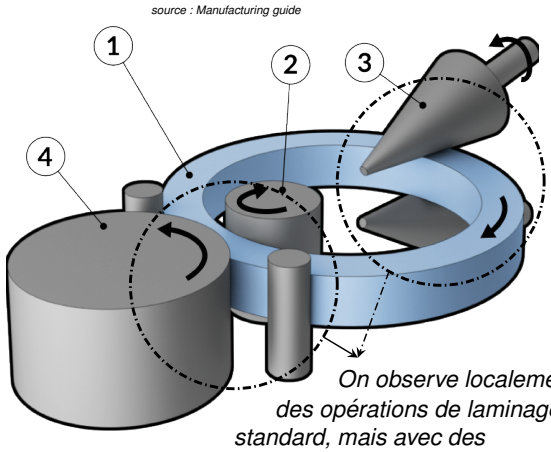


Effet d'alligator



3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant

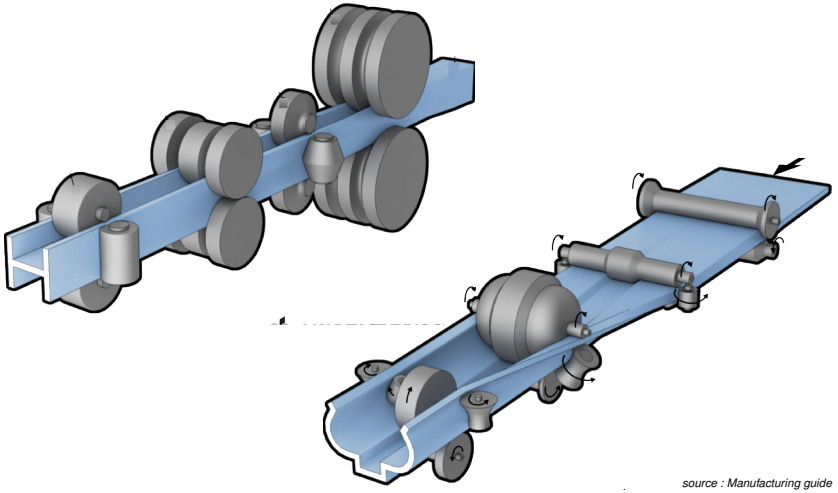
source : Manufacturing guide



- *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.*

On observe localement des opérations de laminage standard, mais avec des conditions (t_0, t_f) qui dépendent du temps

3.4.9 Laminage avancés - laminage de profilés



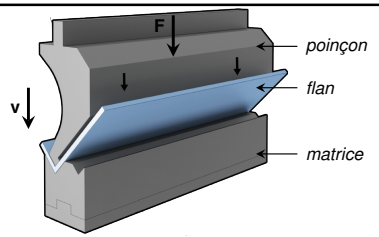
source : Manufacturing guide

Deuxième partie

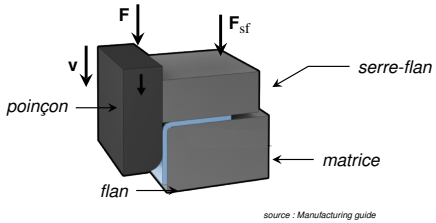
5. Pliage
6. Emboutissage
7. Découpage (poinçonnage)

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



Pliage en coin

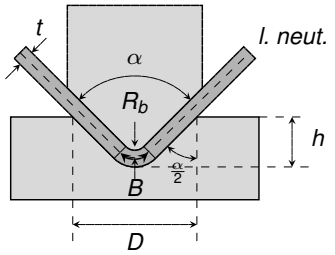
3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

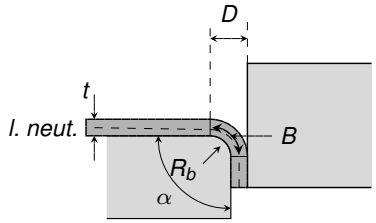
Nom	*Unité*
α : angle de pliage	rad
R_b : rayon de pliage	mm
w : longueur de l'axe de pliage	mm

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)*

- *Pliage en V (angle quelconque) à gauche et pliage en coin (angle de* $90°$*) à droite*





(cf. Annexe 7)

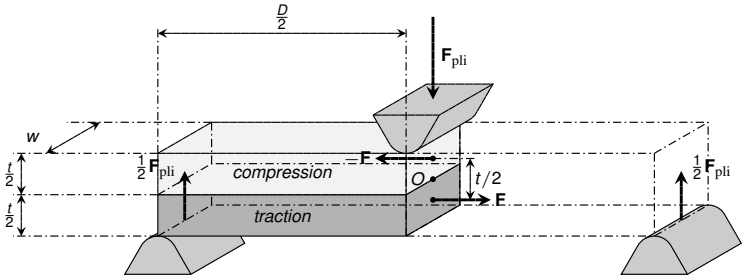
3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- *La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage* F_{pli} *est la force de flexion principale. Les réactions des appuis sont les forces de flexion secondaires. Les fibres supérieures à la surface neutre sont en compression, les fibres inférieures en traction. Le couple des forces de trac.-compr. compense celui de la force d'appui :*

$$F\frac{t}{2} = \frac{1}{2}F_{\text{pli}}\frac{D}{2} \Longrightarrow F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D}$$

- *Dans le cas général,* $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_e w t^2}{D}$ *où* K_b *est un facteur de correction Notons que le travail de pliage fait intervenir la course du poinçon* $\simeq$ *prof. de pliage* h *:*

$$W_{\text{pli}} \simeq K_b \frac{R_e w t^2 h}{D}.$$

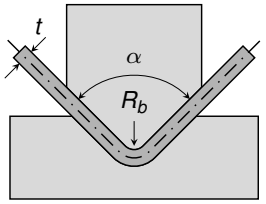


3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

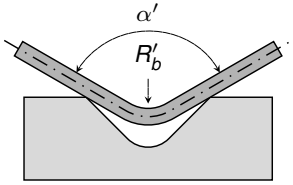
- *Lors du retrait du poinçon, l'angle de pliage a tendance à s'ouvrir :* $\alpha \to \alpha' > \alpha$ *:*
  - *Les fibres allongées ont tendance à se retirer (retrait élastique),*
  - *Les fibres comprimées ont tendance à s'allonger (expansion élastique).*
- *Dans le cas d'un pliage en V et sous les 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 ε_e *:*

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



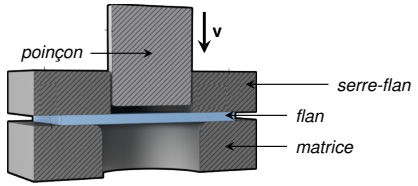
Avant relaxation



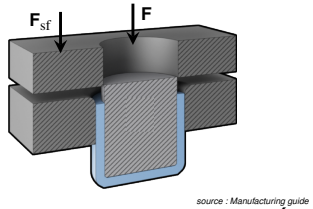
Après relaxation

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



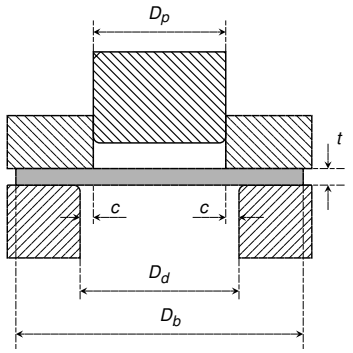
source : Manufacturing guide

Fin de l'opération

3.6.2 Emboutissage - schéma et nomenclature

Nom	Unité
D_p : diamètre du poinçon	mm
D_d : diamètre de la matrice	mm
D_b : diamètre du flan	mm

Nom	Unité
c : dépouille	mm
t : épaisseur du flan	mm



- ***Relations géométriques***
  - $c = \frac{D_d - D_p}{2}$

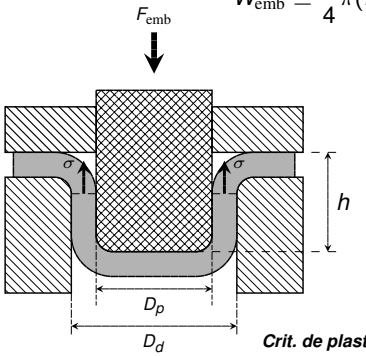
3.6.3 Emboutissage - force et travail

- *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 :*

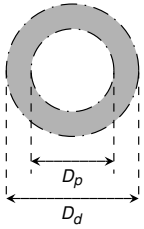
$$F_{\text{emb}} \simeq \frac{1}{4}\pi(D_d^2 - D_p^2)R_e$$

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

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



Pièce emboutie (vue de dessus)



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

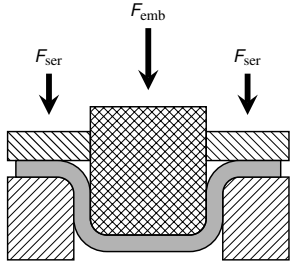
(cf. Annexe 9)

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_{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**.*

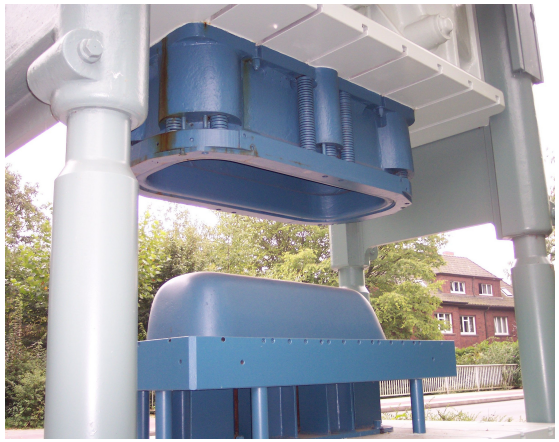


3.6.5 Emboutissage

Exemple de pièces

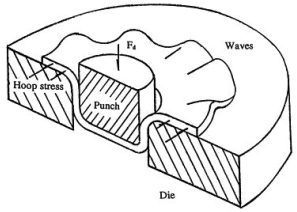






3.6.6 Emboutissage - défauts en emboutissage

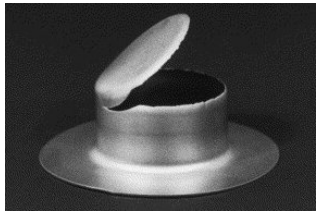
Ondulations



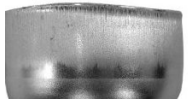
Effets d'oreille

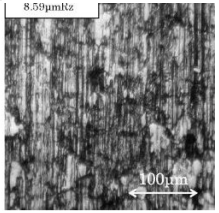


Fissures



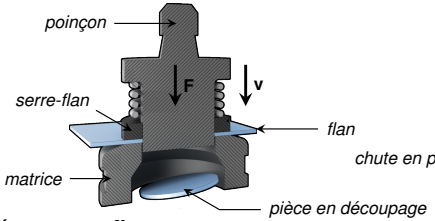
Rayures



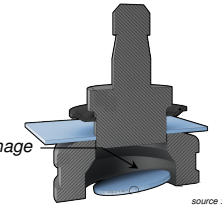


3.7.1 Découpage-poinçonnage - principe

- *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 affutées.*
- *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.*



Découpage fin



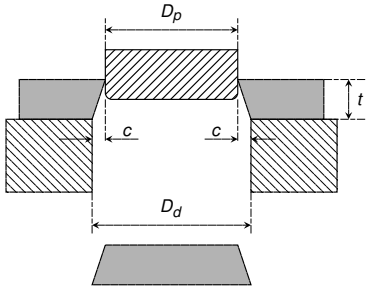
source : Manufacturing guide

Découpage/poinçonnage

3.7.2 Découpage - schéma et nomenclature

Nom	***Unité***
D_p : diamètre du poinçon	mm
D_d : diamètre de la matrice	mm

Nom	***Unité***
c : dépouille	mm
t : épaisseur du flan	mm



- ***Relations géométriques***
  - $c = \frac{D_d - D_p}{2}$

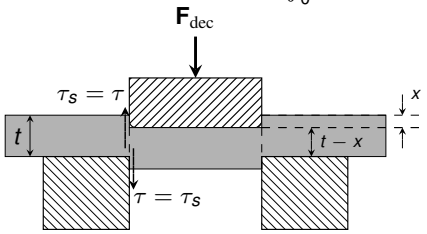
3.7.3 Découpage - force et travail

- *La force de découpage F_{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 τ_s du matériau, il faut que*

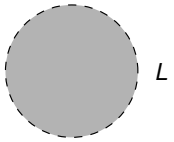
$$F_{\text{dec}} \simeq \tau_s L(t-x), \quad \text{avec } x \text{ : prof. découpée et } L \text{ : pourtour de découpe}$$

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

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



Pièce découpée (vue de dessus)



(cf. Annexe 10)

3.7.4 Pliage, emboutissage et découpage progressif

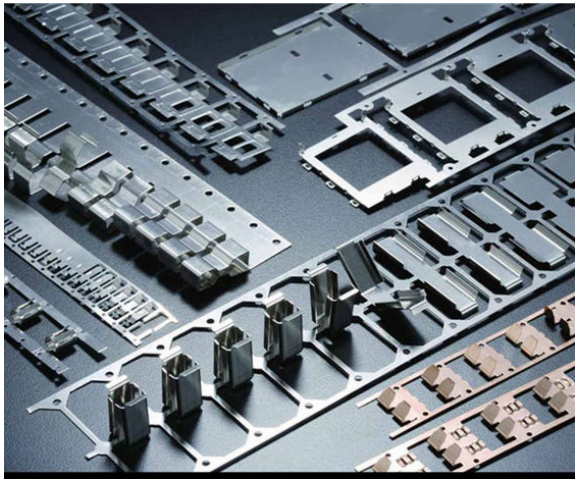
Exemple de pièces



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

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

A 2: Terminologie anglaise

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

A 3: Modèle de frottements Coulombien

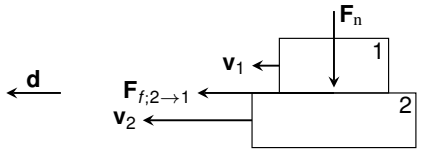
Expression de la force de frottement

- *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*

$$\mathbf{F}_{f;2\to1} = \mu F_n \mathbf{d} \quad \mathbf{d} : \textit{direction unité}, \quad \mu F_n : \textit{amplitude de la force de frott.}$$

- *Dans cette relation, μ 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) :*

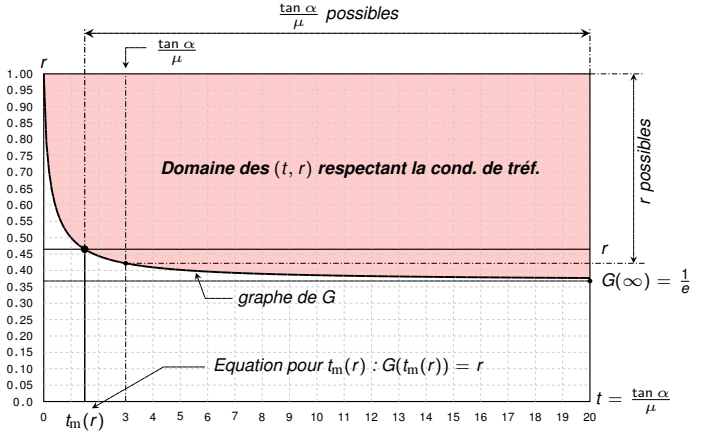
$$\mathbf{d} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{\|\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1\|}$$



A 4: Condition de tréfilage

- *Elle porte sur le facteur de tréfilage r et le rapport de conception $t = \frac{\tan\alpha}{\mu}$ et s'écrit*

$$r \geq G(\frac{\tan\alpha}{\mu}) \qquad \textit{où} \qquad G(t) = \left(\frac{t}{1+t}\right)^t$$



- *Borne sur le rapport de conception :* $\frac{\tan\alpha}{\mu} \geq t_m(r) \Longrightarrow \alpha \geq \alpha_m(r,\mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

A 5: Condition de tréfilage (suite)

- *La valeur $t_m(r)$ au-delà de laquelle le rapport de conception $\frac{\tan\alpha}{\mu}$ doit se trouver est la soltuion t de l'équation la solution t de*

$$G(t) = r \quad \text{où} \quad G(t) = \left(\frac{t}{1+1}\right)^t \tag{24}$$

- *A cause de la forme compliquée de G, cette équation est transcendante. Pour la résoudre on propose la méthode suivante :*

1) *on pose : $t_0 = -\frac{\ln r}{1+\ln r}$*
2) *on applique l'algorithme itératif : $t_{m+1} = \frac{\ln r}{\ln \frac{t_m}{1+t_m}}$, pour $m = 0, 1, 2 \ldots$*

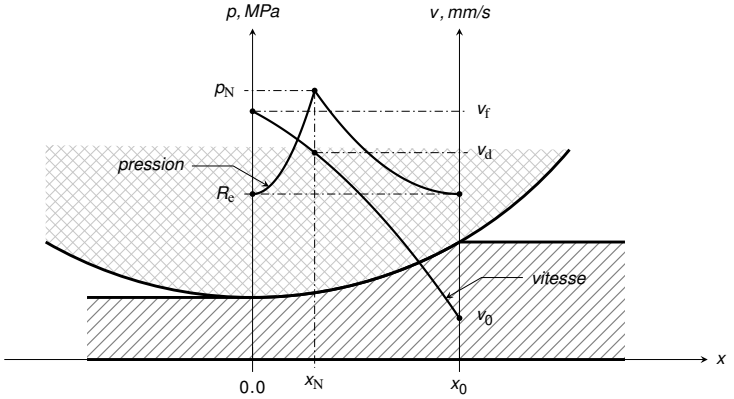
- *Cet algorithme converge vers la solution t de (24) pour autant qu' elle existe (i.e. si $r > 1/e$).*
- *Une fois que la valeur minimale $t_m(r)$ du rapport de conception $\frac{\tan\alpha}{\mu}$ est connue, on trouve la valeur minimale $\alpha_m(r,\mu)$ à donner au demi-angle d'ouverture pour atteindre le rapport de tréfilage r en extrayant l'arc-tangente :*

$$\alpha_m(r,\mu) = \arctan \mu t_m(r). \tag{25}$$

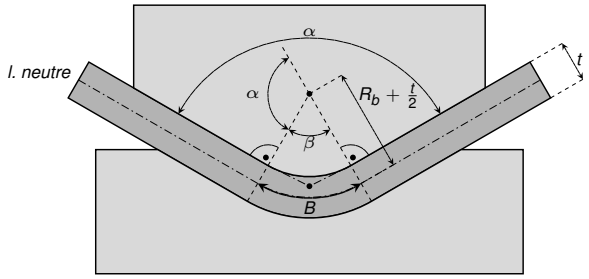
Notez que cette valeur dépend du coefficent de frottement μ.

A 6: Théorie du point neutre en laminage

Colline de pression et vitesses de laminage



A 7: Réserve de pliage



- *On observe que :*

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

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

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

A 8: Calcul de la force de pliage

- *La force de pliage $\mathbf{F}_{\text{pli}}$ 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_{pli} à F :*

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

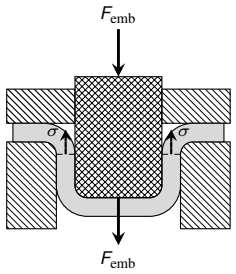
- *La contrainte de traction/compression sur la section dr. se déduit ensuite de F_{pli}*

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

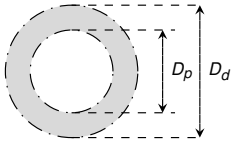
- *Il faut que F_{pli} soit suffisante pour plastifier le matériau*

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

A 9: Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



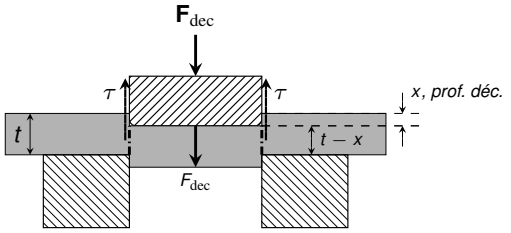
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

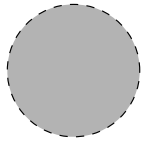
$$-F_{emb} + \frac{\pi}{4}(D_d^2 - D_p^2)\sigma = 0 \Longrightarrow F_{emb} = \frac{\pi}{4}(D_d^2 - D_p^2)\sigma$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

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

A 10: Calcul de la force de découpage





Pièce découpée (vue de dessus)

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

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

- *Rupture du matériau :*

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

A 11: Bibliographie pour le chapitre 3

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

T.G. Byrer, SL 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 Enginneering 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.