

Procédés de fabrication I - IGI - HEIG-VD

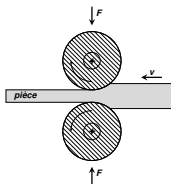
Formage des Matériaux

Résumé

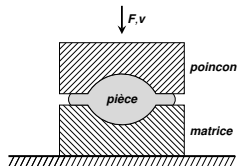
19 décembre 2025

Formage des métaux

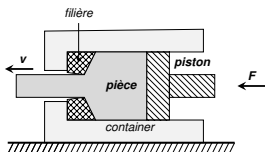
Classification des techniques de formage des pièces massives



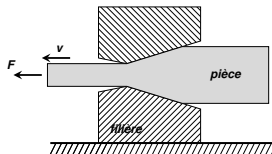
laminage



forgeage (matriçage)



extrusion

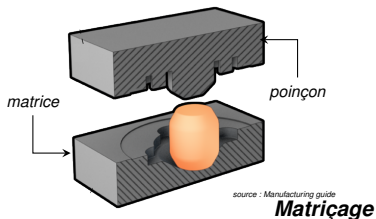
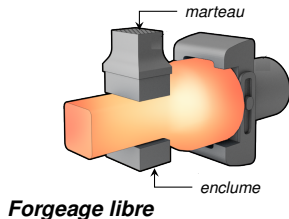


tréfilage

Forgeage

Principe

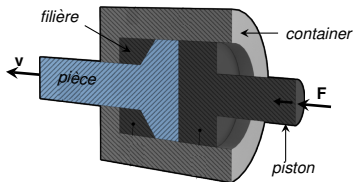
- En forgeage, on met en forme la pièce en la compressant dans une matrice.
- En forgeage **à chaud** la ductilité du matériau est améliorée. Les pièces **forgées à froid** ont de meilleures propriétés mécaniques et sont plus précises.
- On distingue les techn. de forgeage suivant le mode d'application 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).



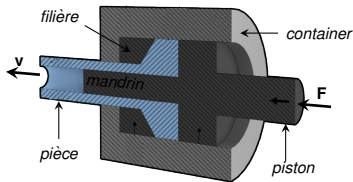
Extrusion

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



Source : Manufacturing guide

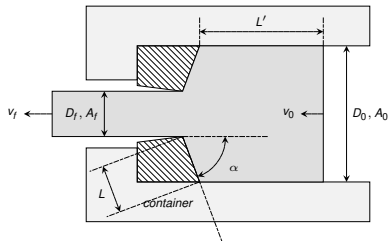
Extrusion avec mandrin

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 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 : $\frac{1}{2}$ 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**

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

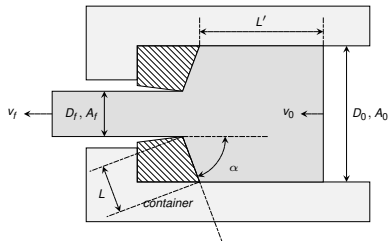
Extrusion - Nomenclature

On pousse !

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 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 : $\frac{1}{2}$ 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**

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

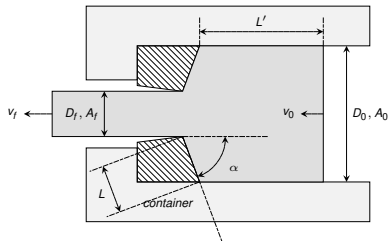
Extrusion - Nomenclature

On pousse !

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 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 : $\frac{1}{2}$ 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)

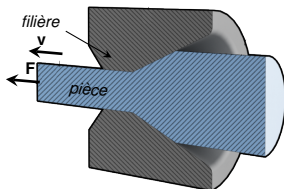
- **Rapport d'extrusion**

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

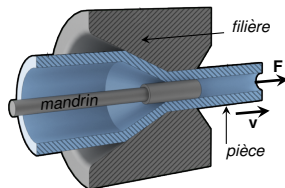
Tréfilage

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



Tréfilage simple



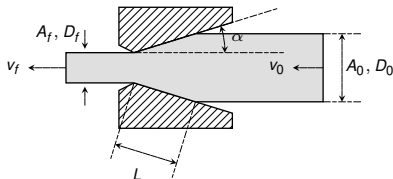
Tréfilage avec mandrin

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 ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

<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
α : $\frac{1}{2}$ 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)

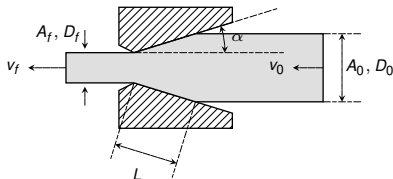
- **Rapport de tréfilage**

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

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 ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

<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
α : $\frac{1}{2}$ 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)

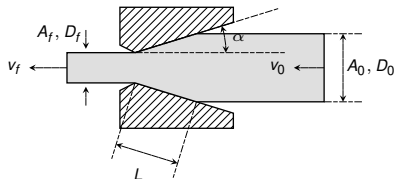
• Rapport de tréfilage

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

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 ²
A_0 : section d'entrée	mm ²

<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
α : $\frac{1}{2}$ 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

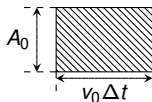
$$r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$$

Extrusion et tréfilage

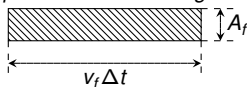
Travail spécifique d'extrusion/tréfilage (matériau plastiquement idéal)

- 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 :

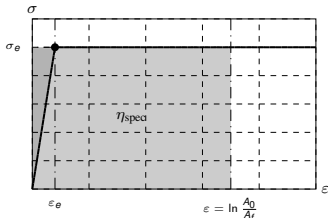


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

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

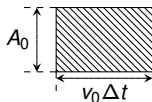
$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon = R_e \ln \frac{A_0}{A_f} = -R_e \ln r \quad (1)$$

Extrusion et tréfilage

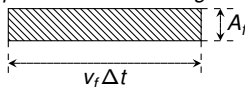
Travail spécifique d'extrusion/tréfilage (matériau plastiquement idéal)

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

avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



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

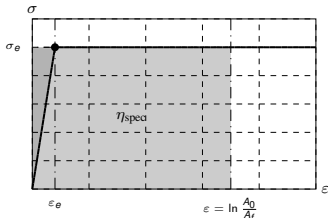


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

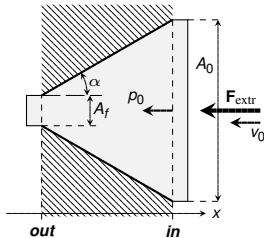
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \epsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e$$

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

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

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 :

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

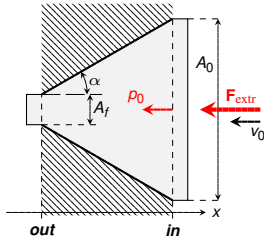
avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_0 v_0$ le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent $p_0 = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport d'extrusion :

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

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

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 :

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

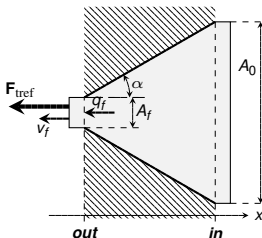
avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_0 v_0$ le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent $p_0 = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport d'extrusion :

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

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

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 :

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

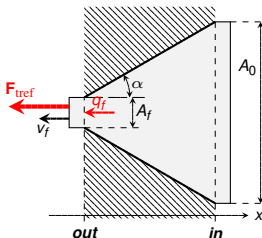
avec η_{spec} le travail spécifique de déformation (1) et $A_f v_f$ le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent $q_f = \eta_{\text{spec}}$ soit avec $r = \frac{A_f}{A_0}$, le rapport de tréfilage :

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

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

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

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

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