

# Procédés de Fabrication I - IGI

## Chapitre 3. Formage des métaux

21 novembre 2025

# 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).*

### 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).

### 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).

### 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).

### 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.*

### 3.1.1 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.

### 3.1.1 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.*

### 3.1.1 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 :*

### 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

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

### 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

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

### 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

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

### 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

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

▶ Bibliographie

### 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

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

### 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

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

▶ Terminologie anglaise

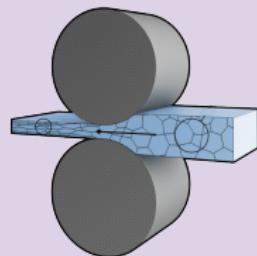
### 3.1.2 Classification des procédés de formage

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

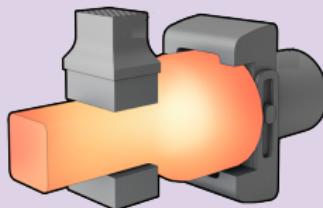
#### Procédés de formage

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

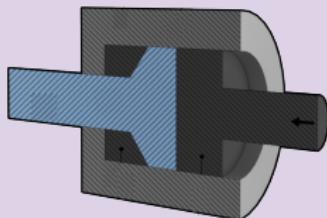
### 3.1.3 Techniques de formage - pièces massives



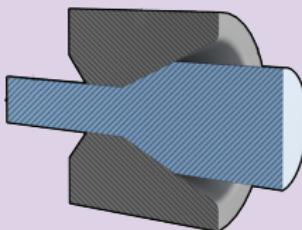
*laminage*



*forgeage (matriçage)*



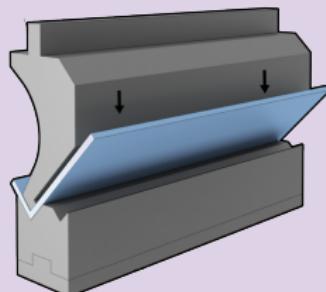
*extrusion*



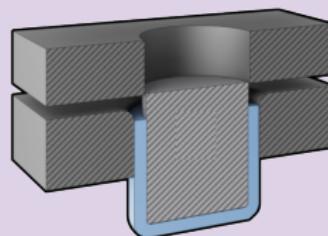
*tréfilage*

source : *Manufacturing guide*

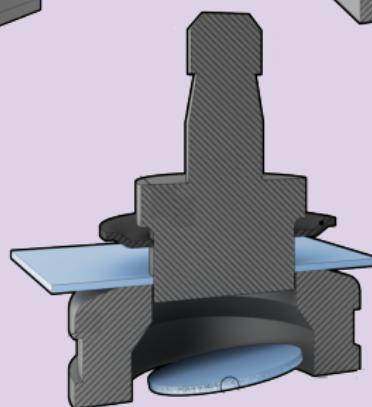
### 3.1.4 Techniques de formage - feuilles



*pliage*



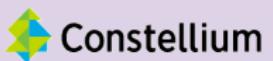
*emboutissage*



*découpage (poinçonnage)*

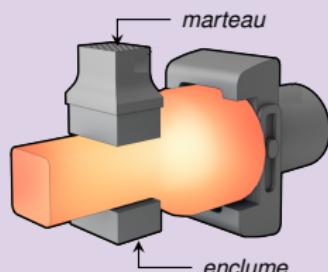
source : Manufacturing guide

### 3.1.5 Formage - quelques adresses en Suisse

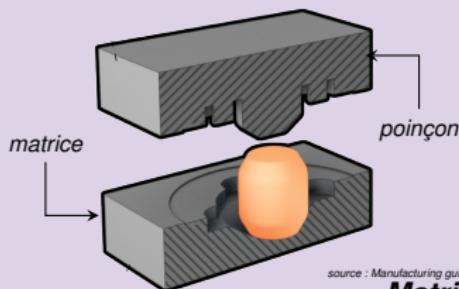
<i>Laminage</i>	 Lamineries <b>MATTHEY SA</b>	<b>Lamineries Matthey SA</b> Rte de Neuchâtel 6 CH-2520 La Neuveville
<i>Emboutissage/matriçage</i>	 <b>MF</b>	<b>Meylan Frères SA</b> Rte du Planoz 31 CH-1348 Le Brassus
<i>Emboutissage/matriçage</i>	 <b>R</b>	<b>Rihs AG</b> Grenchenstrasse 52 CH-2544 Bettlach
<i>Découpage fin</i>	 <b>FEINTOOL</b>	<b>Feintool AG</b> Industriering 8 CH-3250 Lyss
<i>Extrusion</i>	 <b>Constellium</b>	<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 :*  
*type de forgeage :*
- *On distingue aussi les techniques de forgeage selon la façon avec laquelle la matrice constraint l'écoulement latéral du matériau (forgeage libre et matriçage).*



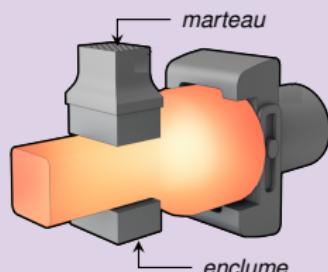
**Forgeage libre**



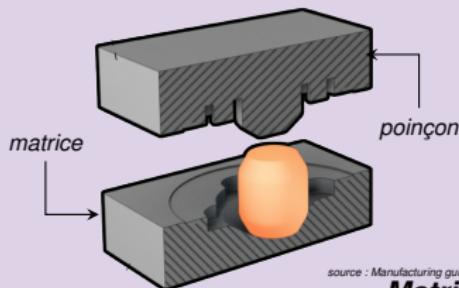
**Matriçage**

### 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 :* **Forgeage à froid** et **Forgeage à chaud**  
*type de forgeage :* **Forgeage libre** et **Matriçage**
- On distingue aussi les techniques de forgeage selon la façon avec laquelle la matrice constraint l'écoulement latéral du matériau (forgeage libre et matriçage).



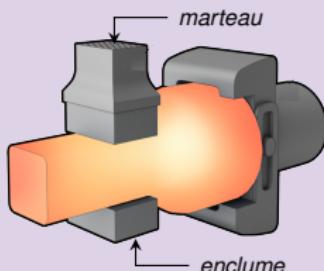
**Forgeage libre**



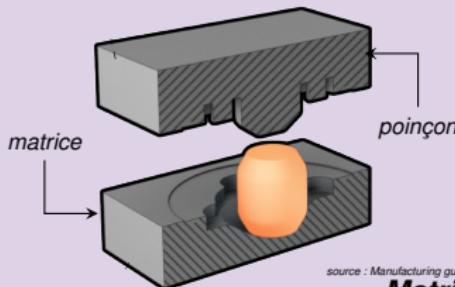
**Matriçage**

### 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 matricage).*



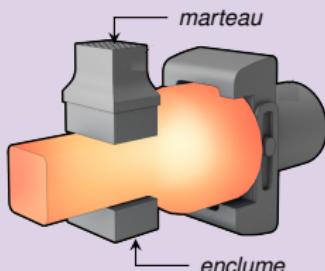
## Forgeage libre



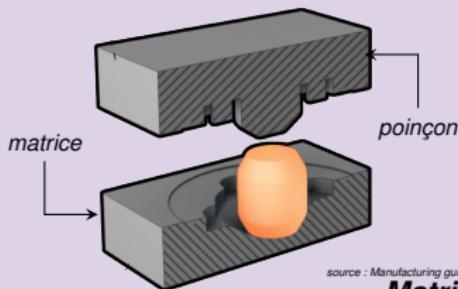
## Manufacturing guide

### 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 constraint l'écoulement latéral du matériau (forgeage libre et matriçage).



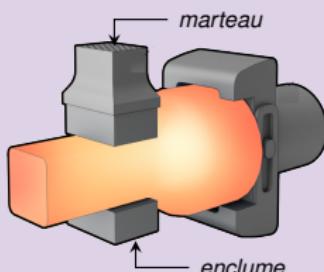
**Forgeage libre**



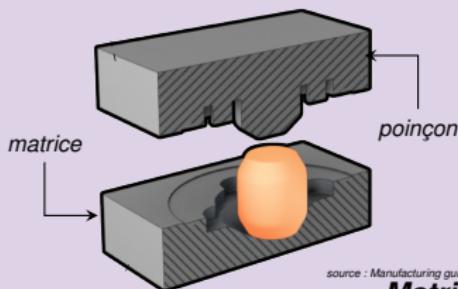
**Matriçage**

### 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 matricage).*



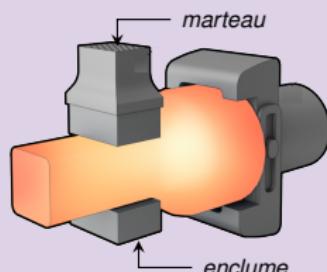
## **Forgeage libre**



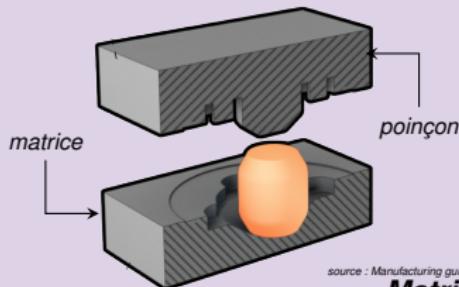
Manufacturing guide

### 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 constraint l'écoulement latéral du matériau (forgeage libre et matricage).*



## Forgeage libre

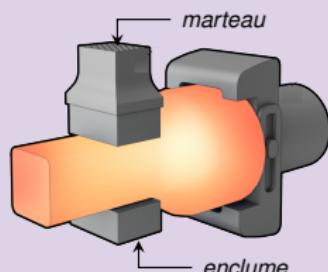


## Manufacturing guide

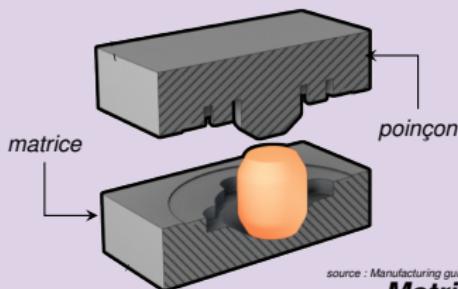
# **Matriçage**

### 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 constraint l'écoulement latéral du matériau (forgeage libre et matricage).*



## Forgeage libre



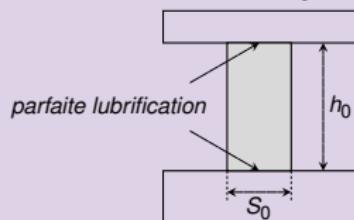
## Manufacturing guide

#### *sources : Manufacturing guide*

▶ Film : ForgingOpenDieForgingHammerForging.mp4

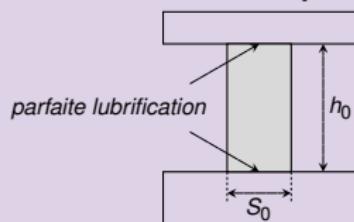
## 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)

### *Etat de départ*

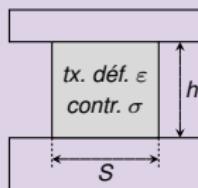


## 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)

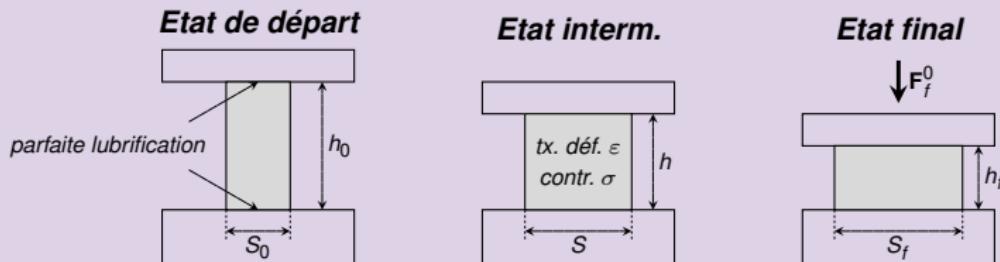
*Etat de départ*



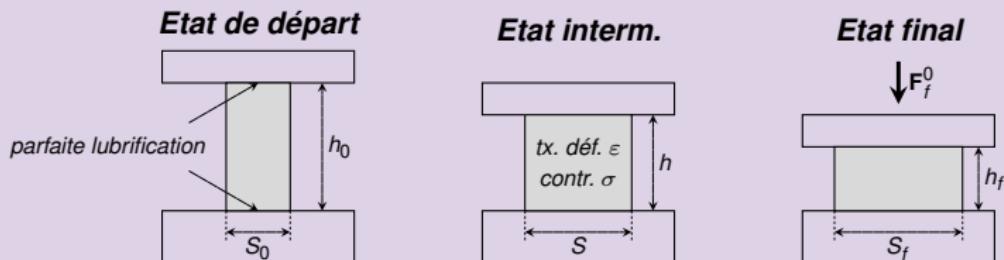
*Etat interm.*



## 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)



### 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)

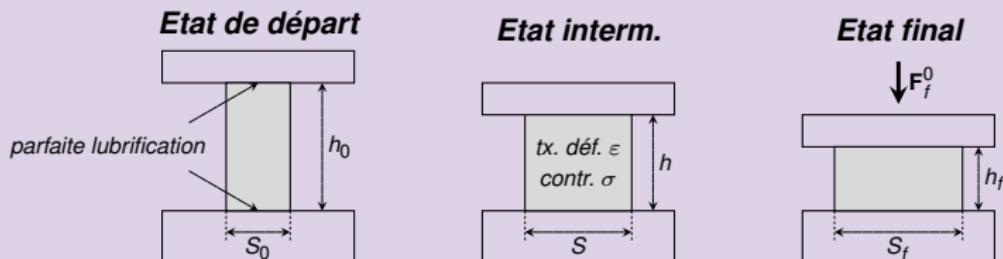


On néglige la frottement entre lopin et matrice

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

$$F_f^0 = S_f \sigma = S_f h_0 \frac{E}{1 + \nu} \ln \frac{h_0}{h_f}$$

### 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)



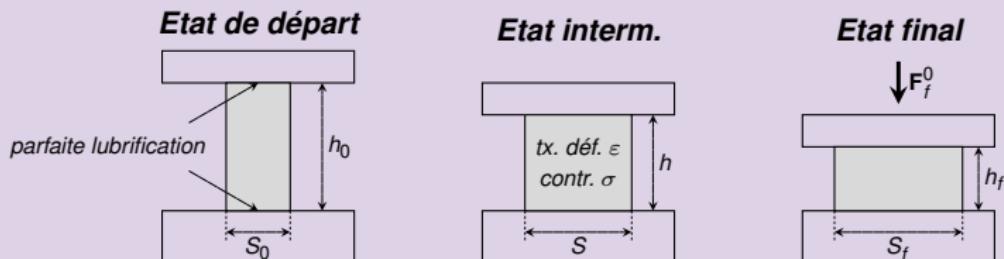
On néglige la frottement entre lopin et matrice

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

$$F_f^0 = S_f \sigma = S_f \cdot E \cdot \varepsilon$$

$$F_f^0 = S_f \cdot E \cdot \ln \frac{h_0}{h}$$

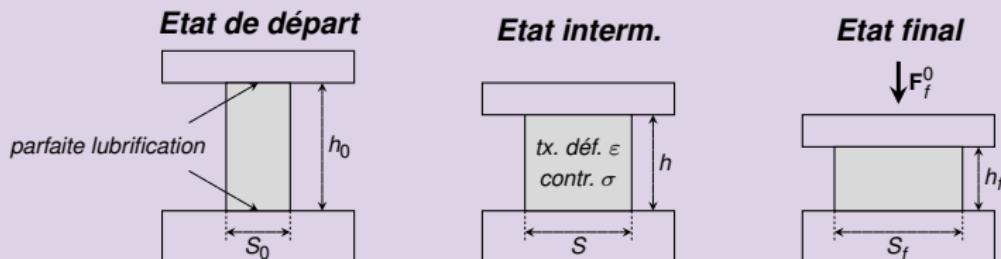
### 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)



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  $\sigma$  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)

### 3.2.2 Forgeage libre - force (sans frott.)

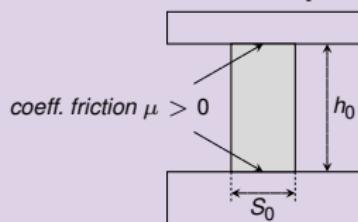


On néglige la frottement entre lopin et matrice

- Dans ce cas, le forgeage libre est une **compression uniforme**.
- Les lois du chap. 2 (Hooke, Ludwik, ...) donnent  $\sigma$  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)

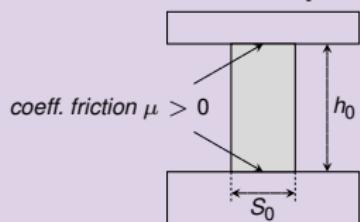
### 3.2.3 Forgeage libre - force (avec frott.)

#### *Etat de départ*

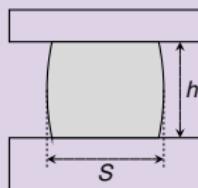


### 3.2.3 Forgeage libre - force (avec frott.)

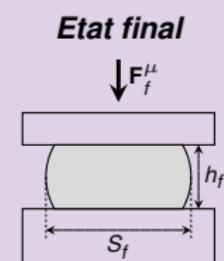
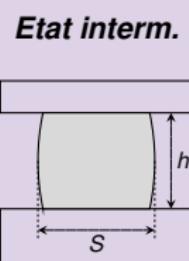
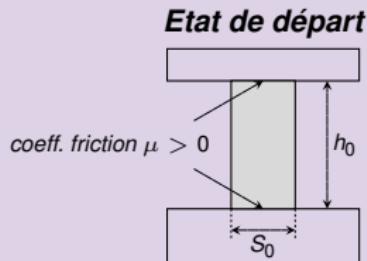
*Etat de départ*



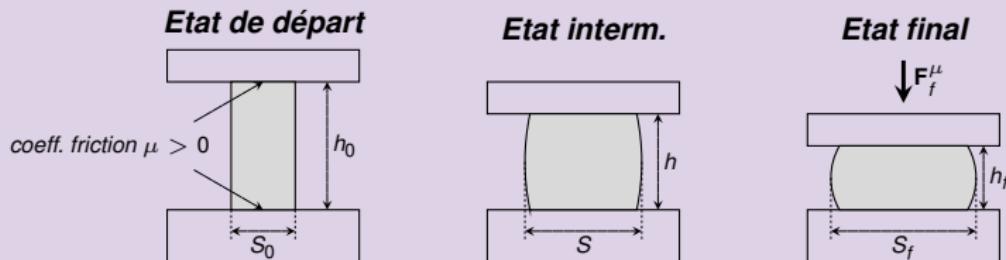
*Etat interm.*



### 3.2.3 Forgeage libre - force (avec frott.)



### 3.2.3 Forgeage libre - force (avec frott.)



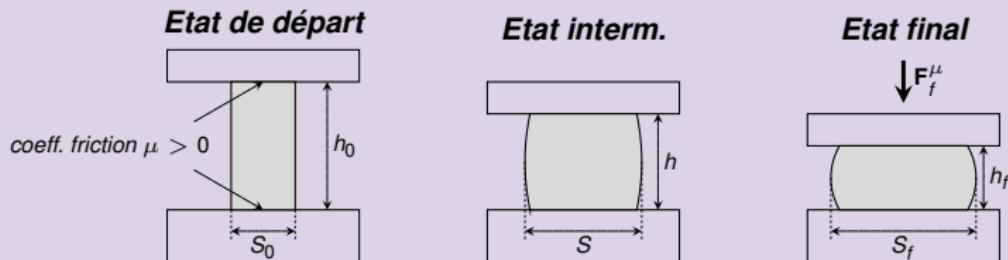
Le frottement entre lopin et matrice est prise en compte

- 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 :

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

$C \simeq 0.45$  pour une section circulaire.

### 3.2.3 Forgeage libre - force (avec frott.)



Le frottement entre lopin et matrice est prise en compte

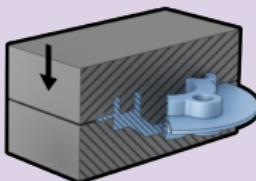
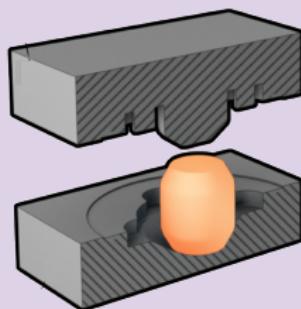
- Dans ce cas, l'état de contrainte n'est plus une **compression uniforme**.
- Différents modèles permettent d'étudier cet état de contrainte (lignes de gliss.).
- Le résultat est que la force de forgeage avec frottement est une correction de la force de forgeage sans frottement :

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

$C \simeq 0.45$  pour une section circulaire.

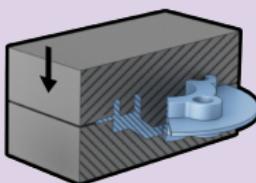
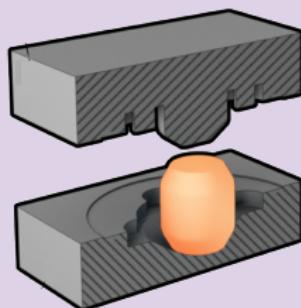
### 3.2.4 Procédés de forgeage avancé -matriçage

- *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.*



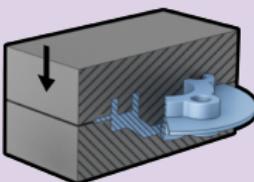
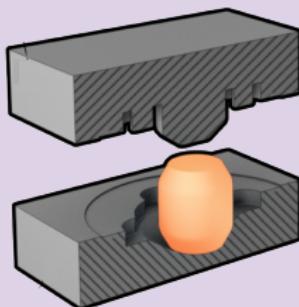
### 3.2.4 Procédés de forgeage avancé -matriçage

- *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.*



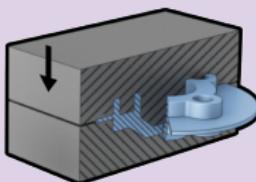
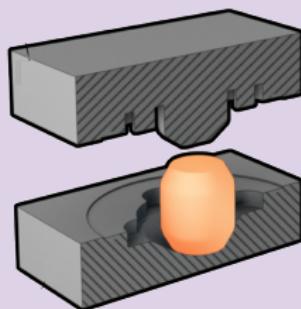
### 3.2.4 Procédés de forgeage avancé -matriçage

- 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.



### 3.2.4 Procédés de forgeage avancé -matriçage

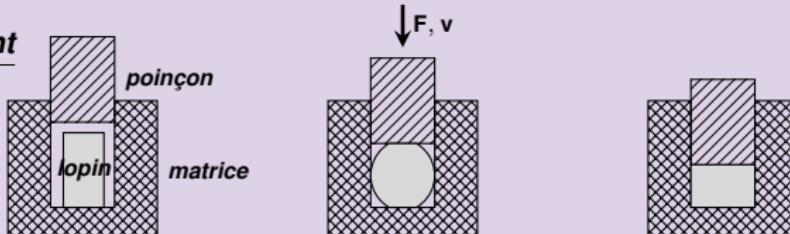
- *On donne à l'outil la forme inverse de la pièce à fabriquer.*
- *Le plan de joint entre matrice inférieure et supérieure (poinçon) n'est pas complètement ajusté et permet l'écoulement du matériau en excès. Il en résulte une bavure qui devra être éliminée en finition (ébauche à usiner).*
- *Plusieurs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



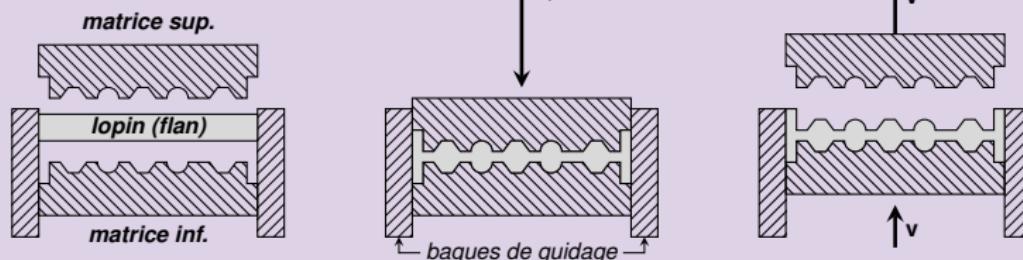
### 3.2.5 Forgeage avancé - matriçage de précision

- 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



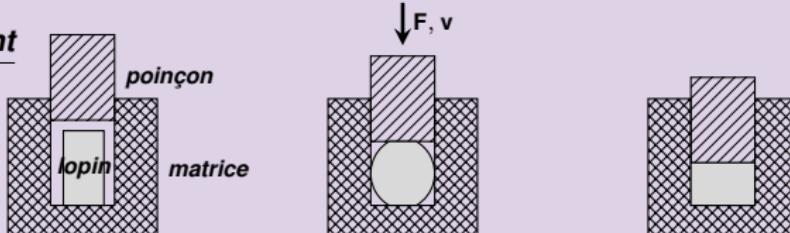
#### Matrices guidées (frappe)



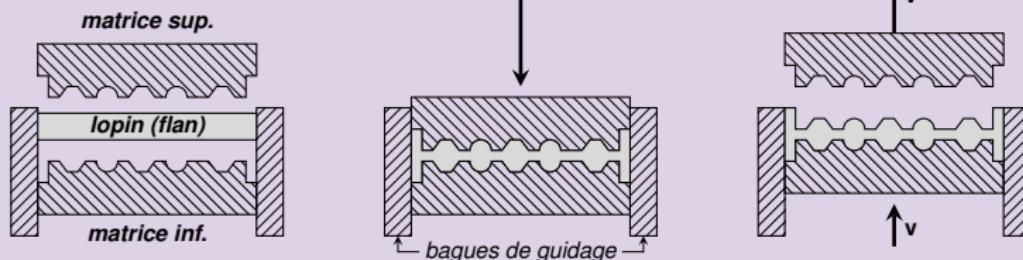
### 3.2.5 Forgeage avancé - matriçage de précision

- 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



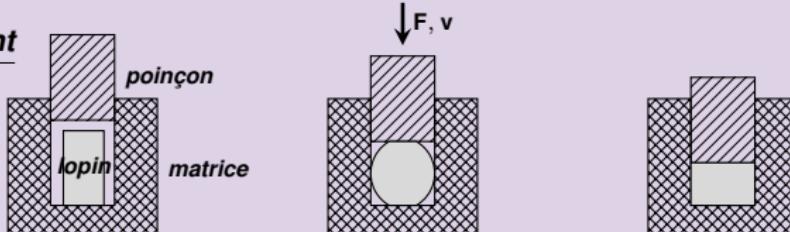
#### Matrices guidées (frappe)



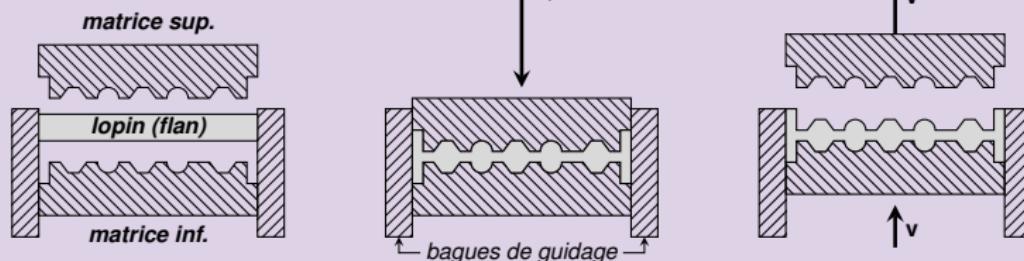
### 3.2.5 Forgeage avancé - matriçage de précision

- 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



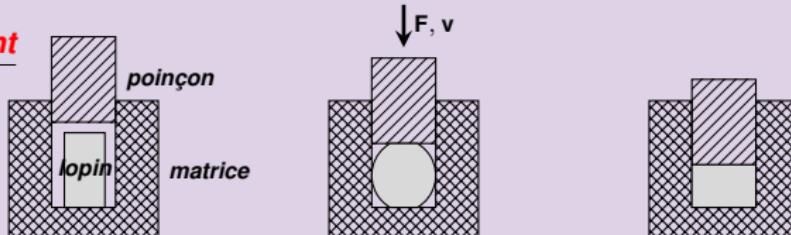
#### Matrices guidées (frappe)



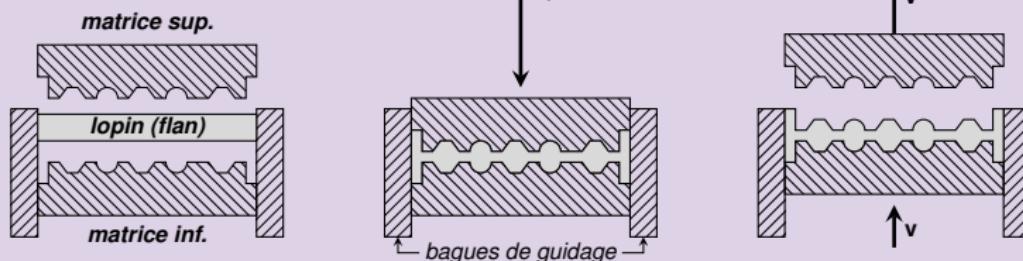
### 3.2.5 Forgeage avancé - matriçage de précision

- 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



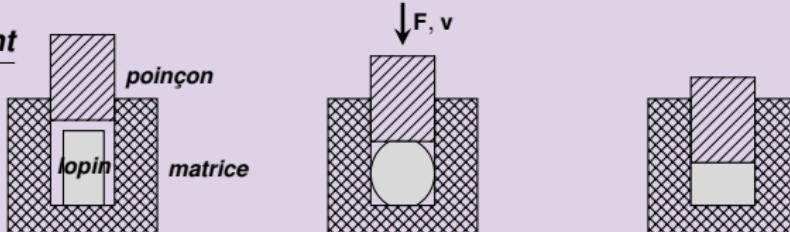
#### Matrices guidées (frappe)



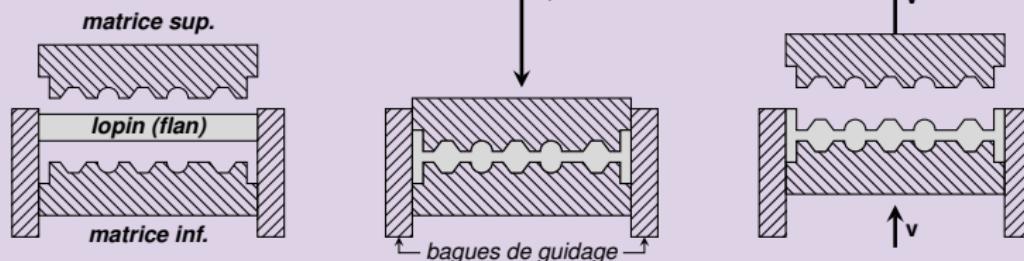
### 3.2.5 Forgeage avancé - matriçage de précision

- 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!).

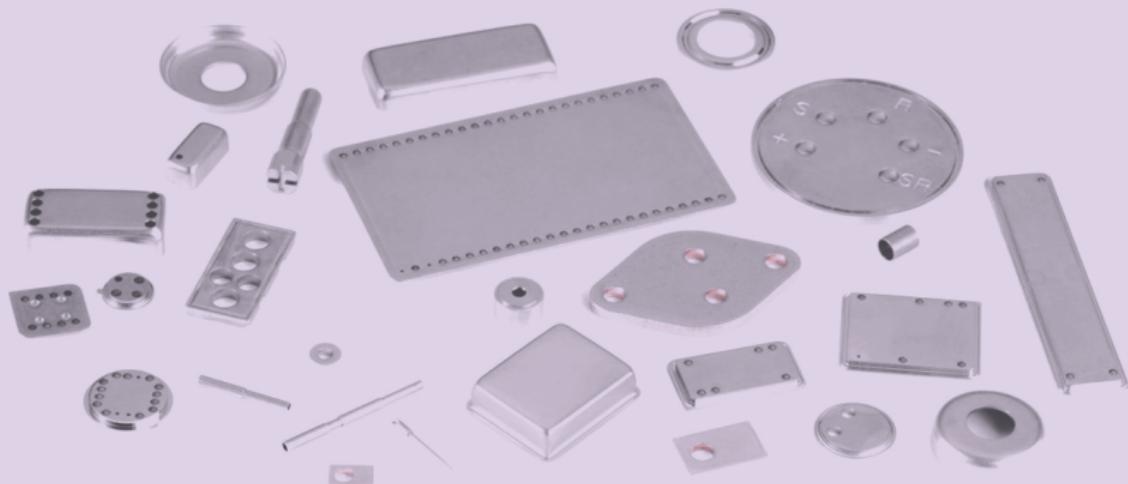
#### Poinçon coulissant



#### Matrices guidées (frappe)

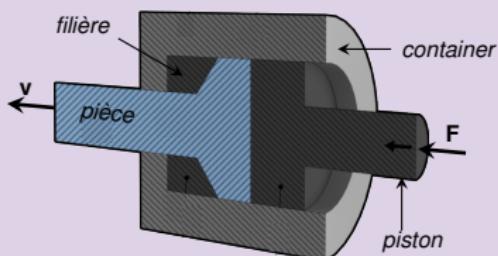


### 3.2.6 Matriçage de précision, exemple de pièces

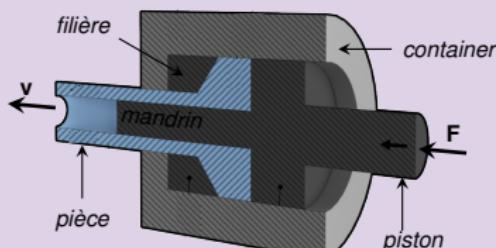


### 3.3.1 Extrusion - principe

- *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**

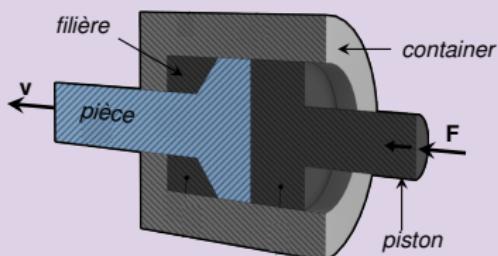


**Extrusion avec mandrin**

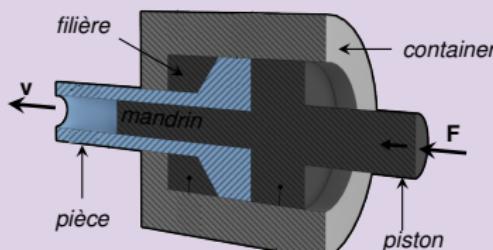
Source : Manufacturing guide

### 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**

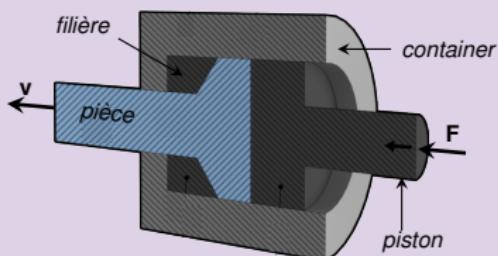


**Extrusion avec mandrin**

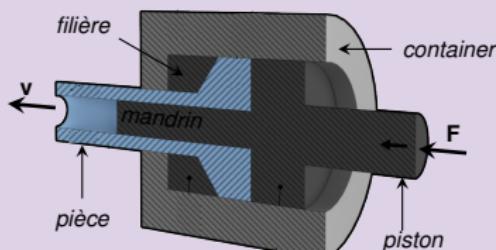
Source : Manufacturing guide

### 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**

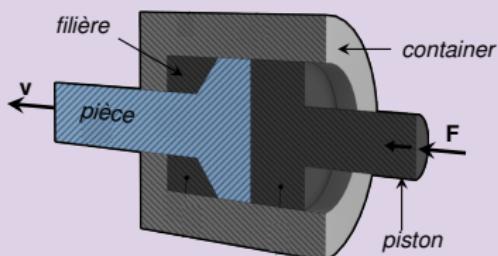


**Extrusion avec mandrin**

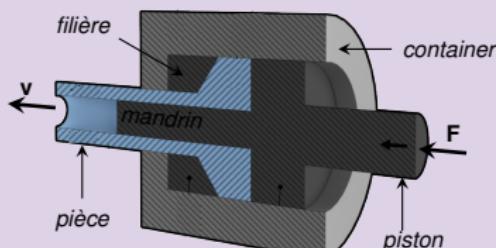
Source : Manufacturing guide

### 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**

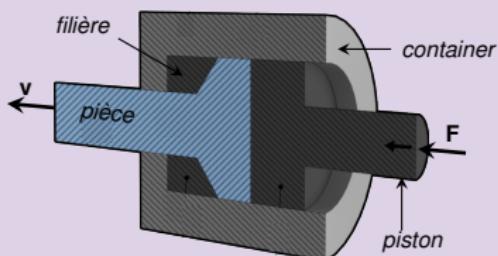


**Extrusion avec mandrin**

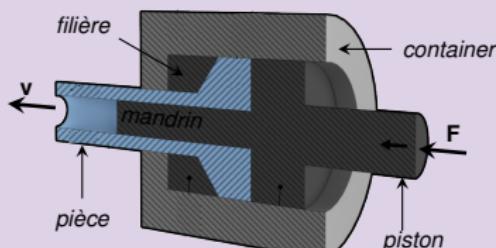
Source : Manufacturing guide

### 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**

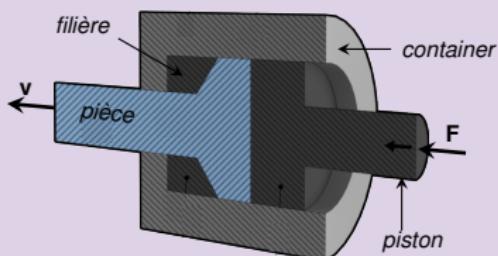


**Extrusion avec mandrin**

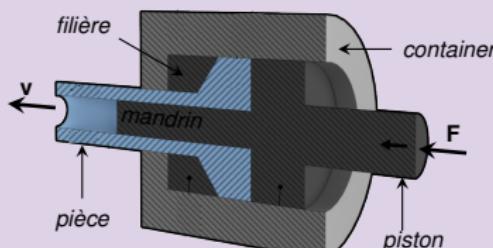
Source : Manufacturing guide

### 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**

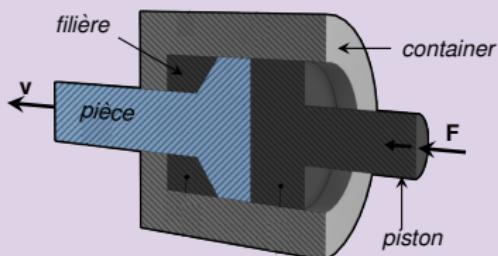


**Extrusion avec mandrin**

▶ Film : AluminumExtrusion.mp4

### 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 :*



**Extrusion directe**

### 3.3.2 Extrusion directe et indirecte

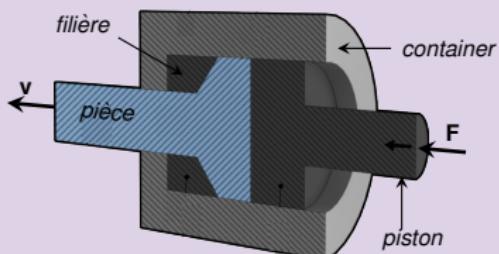
- *En extrusion directe :*
  - la *filière* est fixée au *container*,
  - la *pièce extrudée* se déplace dans le sens de la force appliquée au piston.

- *En extrusion indirecte :*

la *filière* est fixée au *container*,

la *pièce extrudée* se déplace dans le sens opposé à la force appliquée au piston,

grâce au mouvement inverse du *container*.



**Extrusion directe**

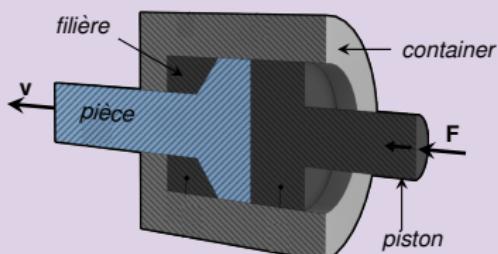
### 3.3.2 Extrusion directe et indirecte

- *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 déportée

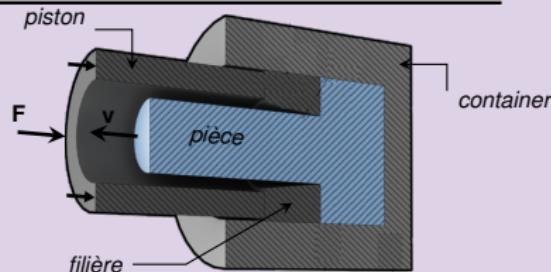
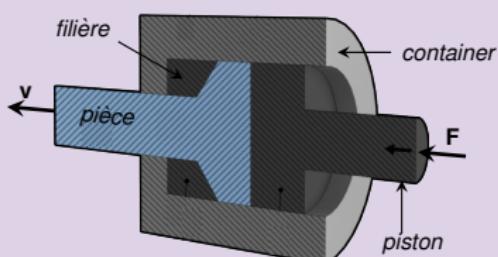
la pièce est déportée et déplace dans le sens opposé à la force appliquée au piston,  
vers le mouvement inverse du container



**Extrusion directe**

### 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.

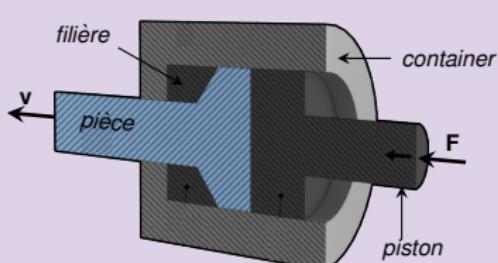


**Extrusion directe**

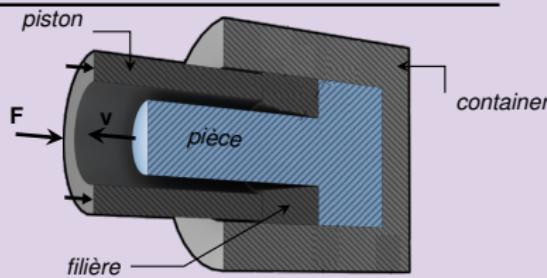
**Extrusion indirecte**

### 3.3.2 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.



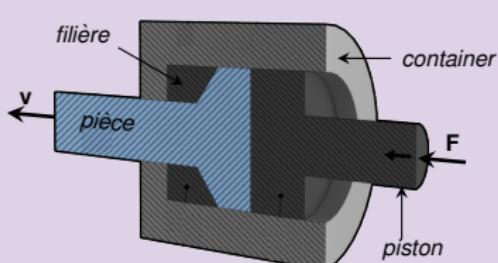
**Extrusion directe**



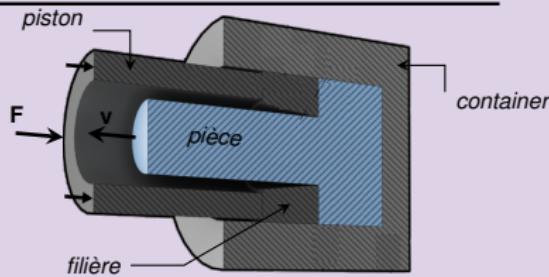
**Extrusion indirecte**

### 3.3.2 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.



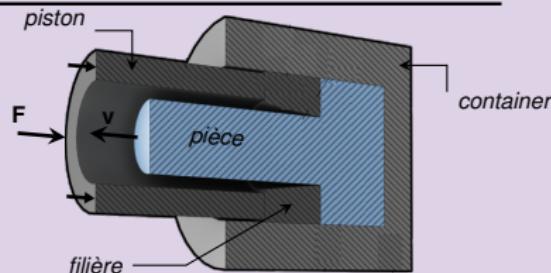
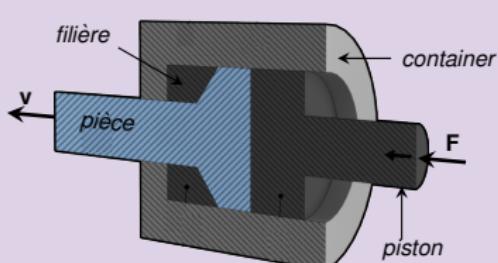
**Extrusion directe**



**Extrusion indirecte**

### 3.3.2 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.**

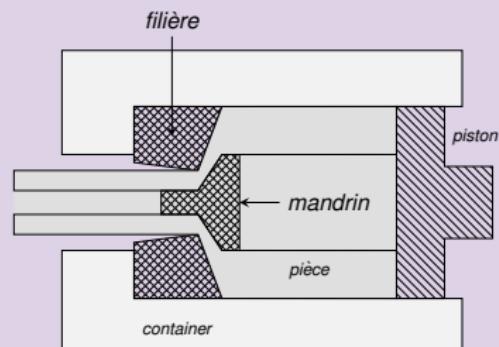


**Extrusion directe**

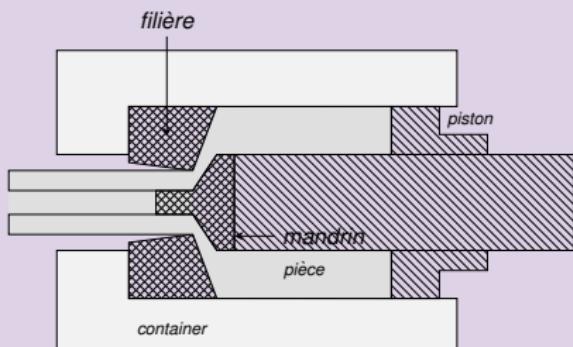
**Extrusion indirecte**

### 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.



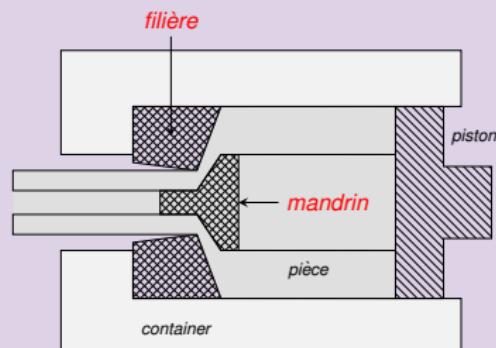
**Mandrin flottant**



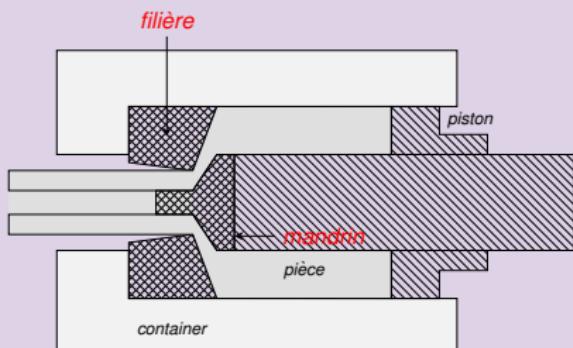
**Mandrin fixe**

### 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.



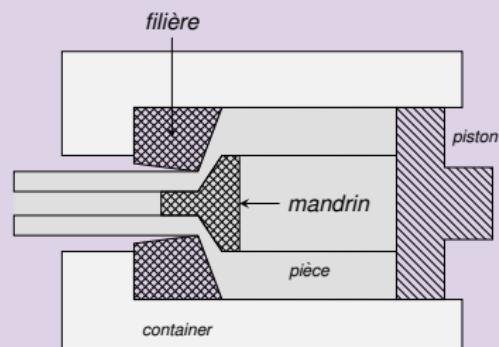
**Mandrin flottant**



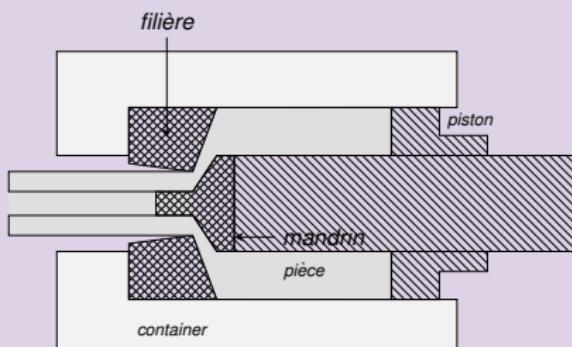
**Mandrin fixe**

### 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.



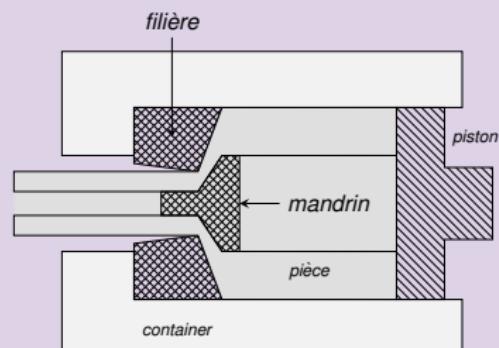
**Mandrin flottant**



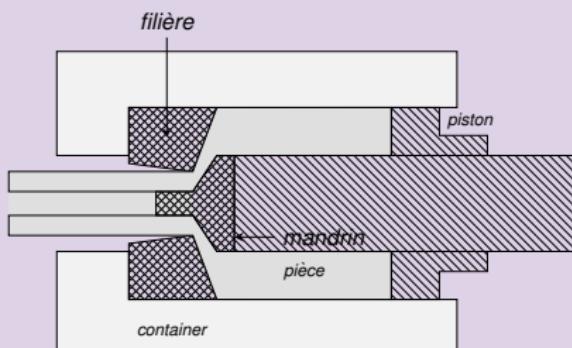
**Mandrin fixe**

### 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.
- mandrin flottant plus long que le lopin



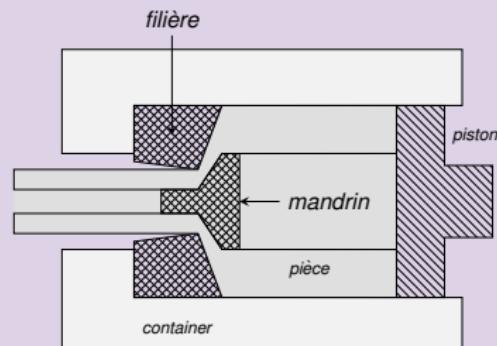
**Mandrin flottant**



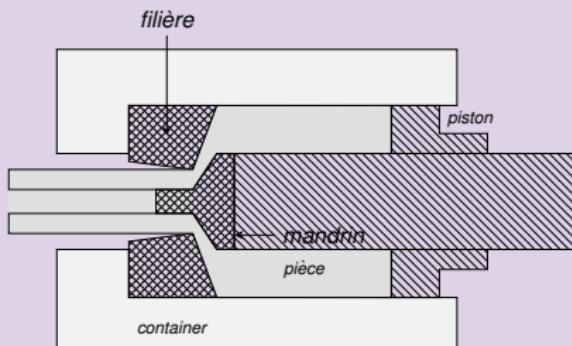
**Mandrin fixe**

### 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.



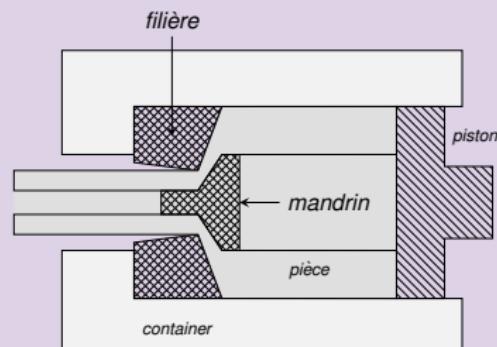
**Mandrin flottant**



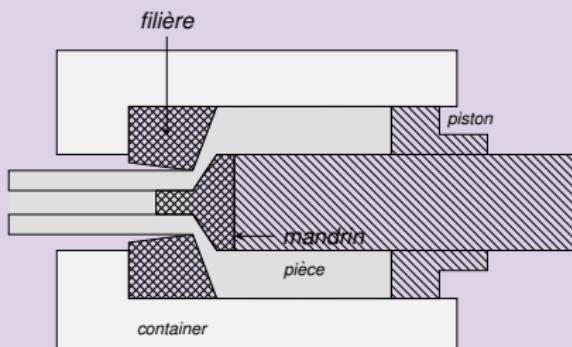
**Mandrin fixe**

### 3.3.3 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.



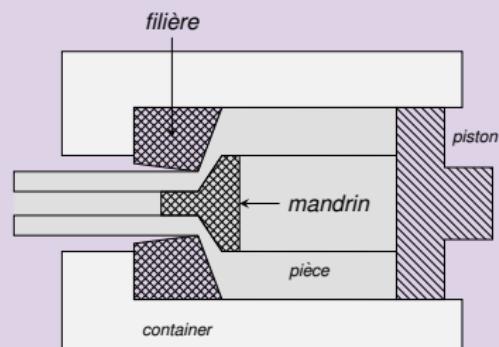
**Mandrin flottant**



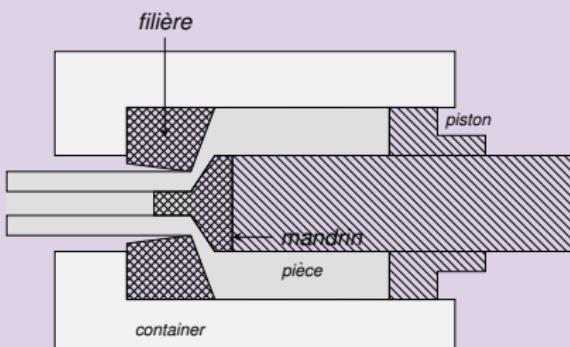
**Mandrin fixe**

### 3.3.3 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**

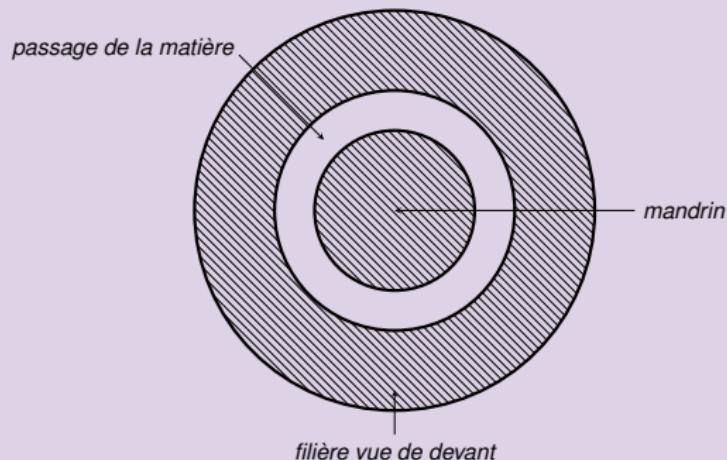


**Mandrin fixe**

▶ Film : ExtrusionMandrinFixe.mp4

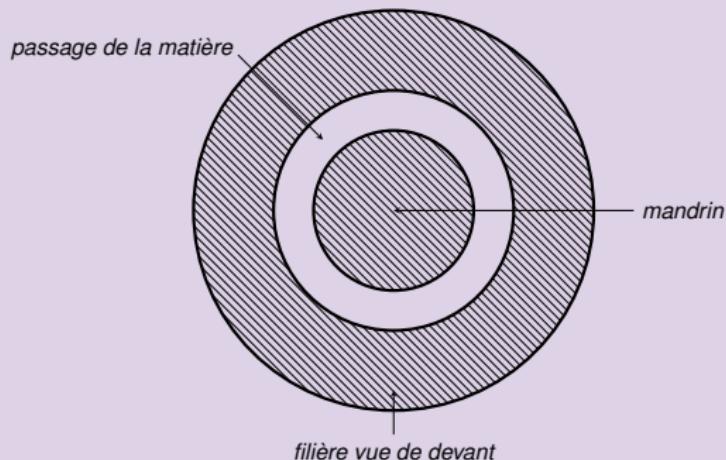
### 3.3.4 Intégration du mandrin

- *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.*



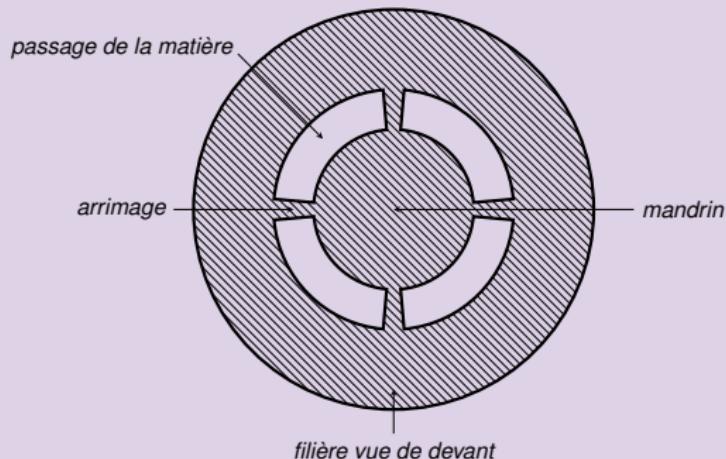
### 3.3.4 Intégration du mandrin

- *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.*



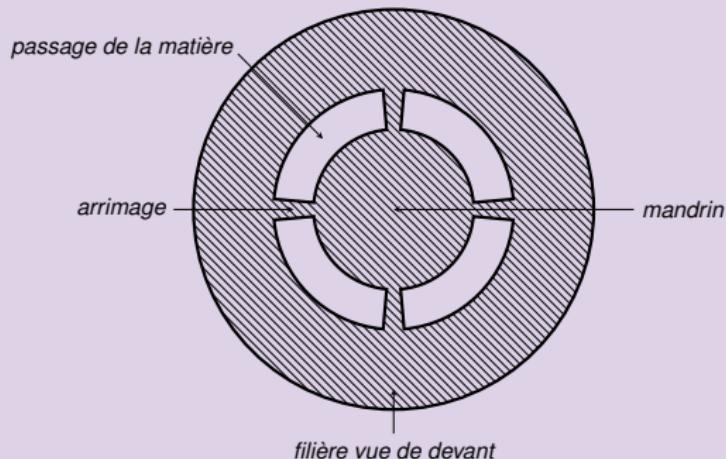
### 3.3.4 Intégration du mandrin

- *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.*



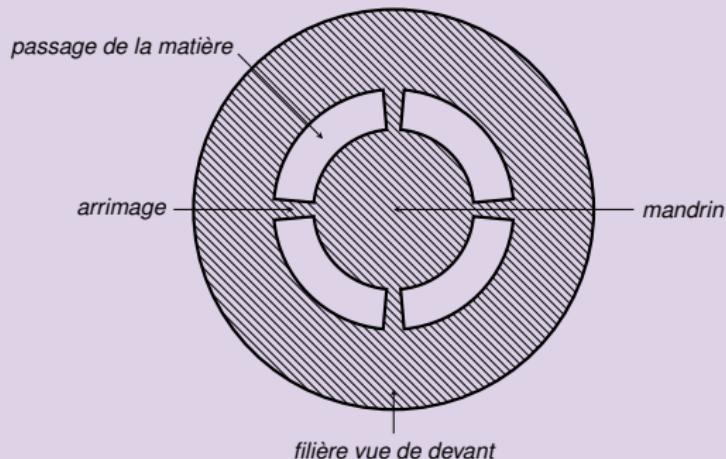
### 3.3.4 Intégration du mandrin

- *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.*



### 3.3.4 Intégration du mandrin

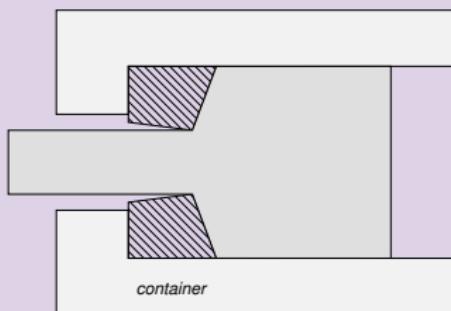
- *S'il est arrimé à la filière, le mandrin peut parvenir à percer le lopin.*
- *Dans un tel cas, les arrimages vont fendre la paroi de la pièce.*
- *Si l'extrusion se fait à chaud, la matière est en principe susceptible de se ressouder après la filière.*



### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

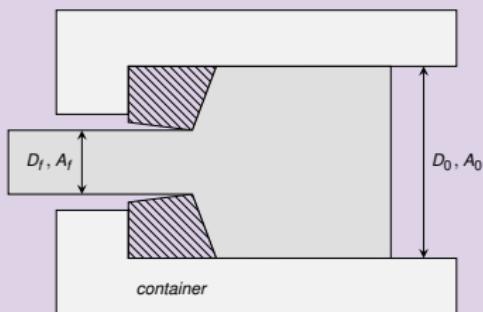


- *Relations géométriques*
- *Relations physiques*
- *Rapport d'extrusion*

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

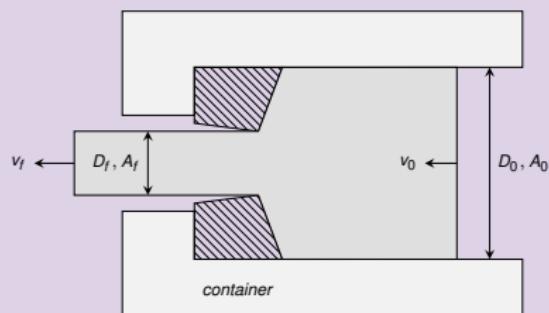


- *Relations géométriques*
- *Relations physiques*
- *Rapport d'extrusion*

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

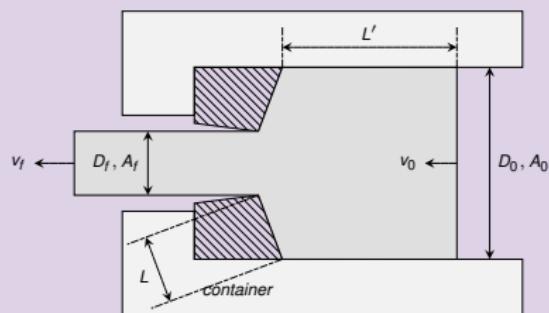


- Relations géométriques
- Relations physiques
- Rapport d'extrusion

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

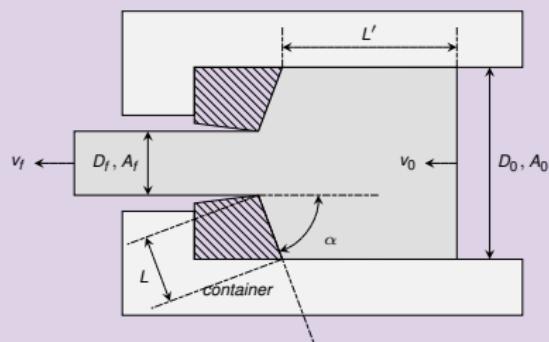


- Relations géométriques
- Relations physiques
- Rapport d'extrusion

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

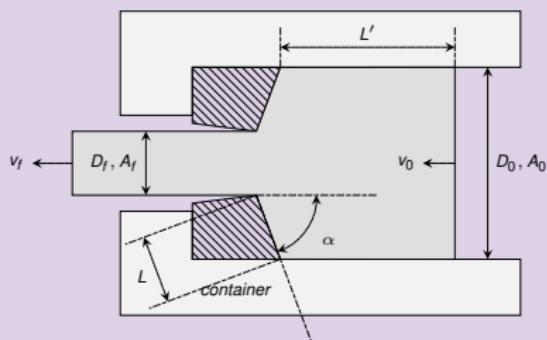


- Relations géométriques
- Relations physiques
- Rapport d'extrusion

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

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

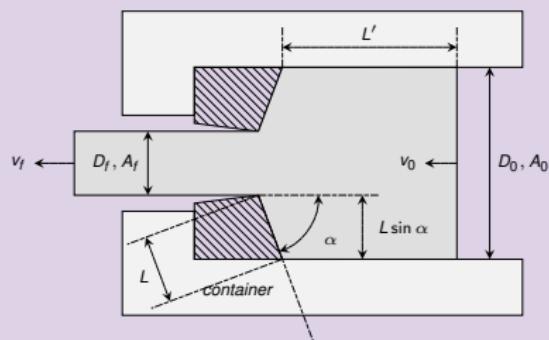
- **Relations physiques**

- **Rapport d'extrusion**

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

$$v_0 = v_f \frac{D_0}{D_f}$$

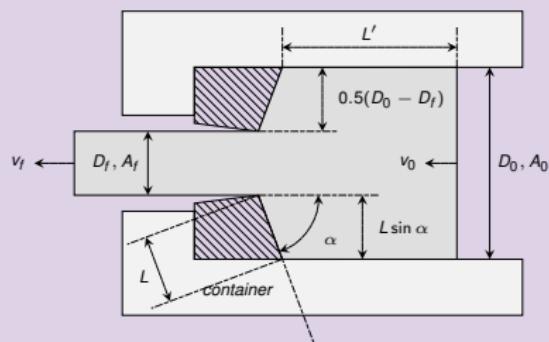
(conservation de la masse)

- **Rapport d'extrusion**

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

$$v_0 = v_f \frac{D_0}{D_f}$$

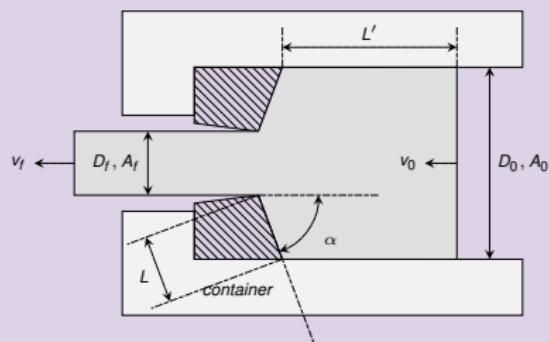
(conservation de la masse)

- **Rapport d'extrusion**

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

<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
$L, L'$ : 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**

$$v_f A_f = v_0 A_0$$

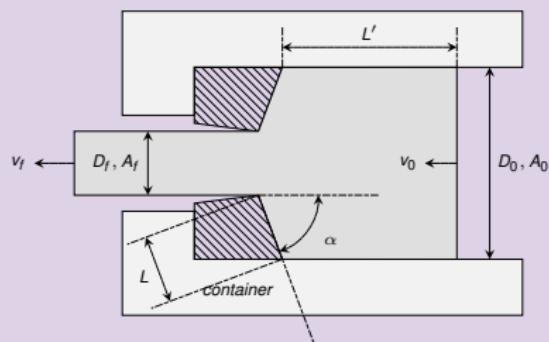
(incompressibilité)

- **Rapport d'extrusion**

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

<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
$L, L'$ : 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**

$$v_f A_f = v_0 A_0$$

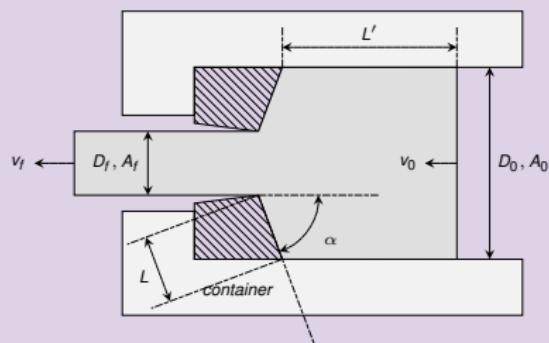
(incompressibilité)

- **Rapport d'extrusion**

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

<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
$L, L'$ : longueurs de contact	mm
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

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

- **Relations physiques**

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

(incompressibilité)

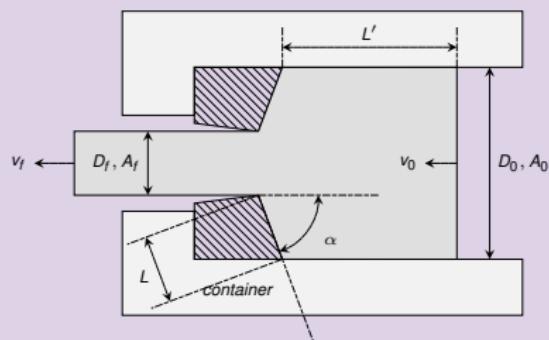
- **Rapport d'extrusion**

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

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

<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
$L, L'$ : longueurs de contact	mm
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

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

- **Relations physiques**

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

(incompressibilité)

- **Rapport d'extrusion**

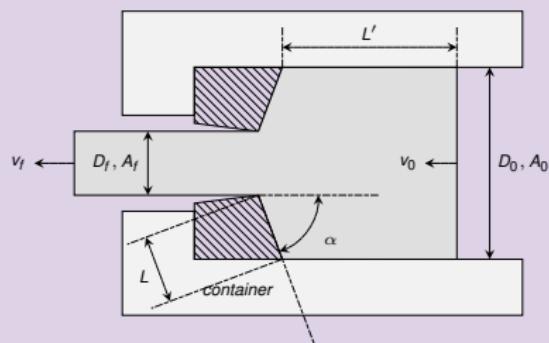
$$\cdot r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$$

► diverses formules aux Tableaux

### 3.3.5 Extrusion - schéma et nomenclature

<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
$L, L'$ : longueurs de contact	mm
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

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

- **Relations physiques**

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

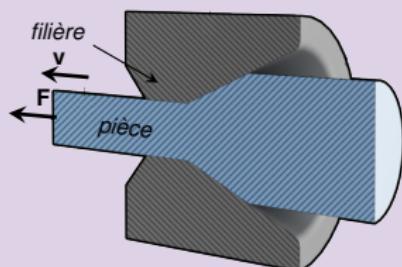
(incompressibilité)

- **Rapport d'extrusion**

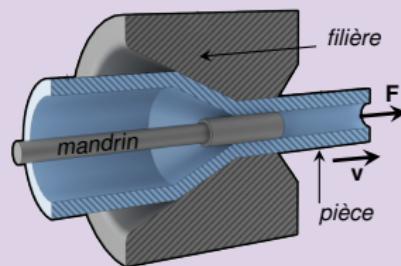
$$\cdot r = \frac{A_f}{A_0} \leq 1$$

### 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 traitements thermiques sont généralement nécessaires (**pattementage**).



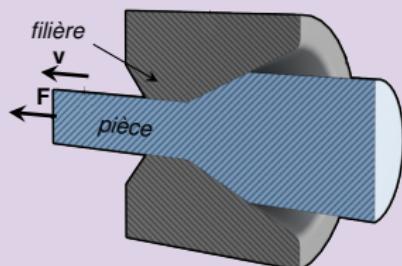
**Tréfilage simple**



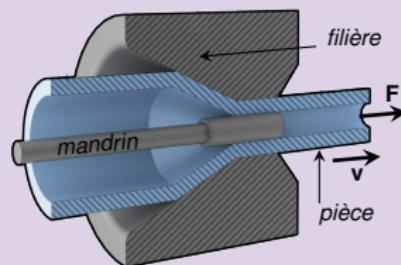
**Tréfilage avec mandrin**

### 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 (**pattementage**).



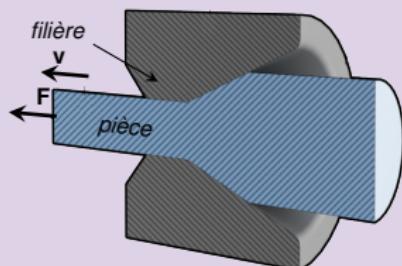
**Tréfilage simple**



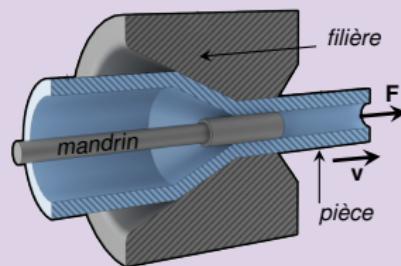
**Tréfilage avec mandrin**

### 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 (**pattementage**).



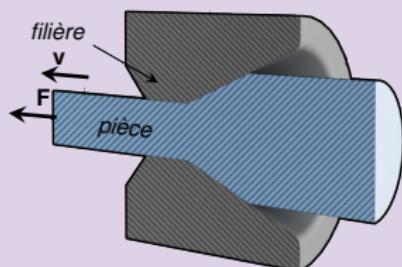
**Tréfilage simple**



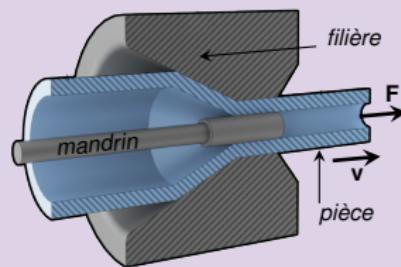
**Tréfilage avec mandrin**

### 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 (**pattementage**).



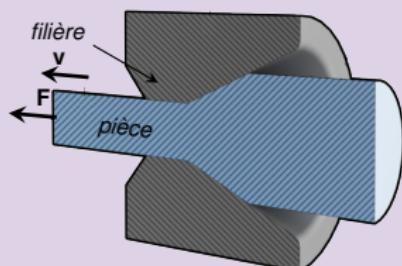
**Tréfilage simple**



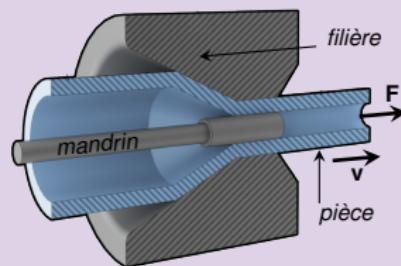
**Tréfilage avec mandrin**

### 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 traitements thermiques sont généralement nécessaires (**pattement**).



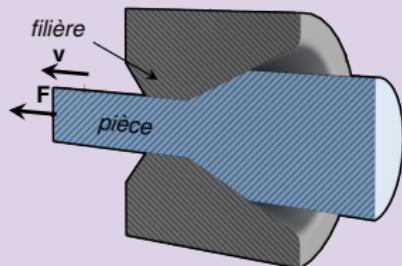
**Tréfilage simple**



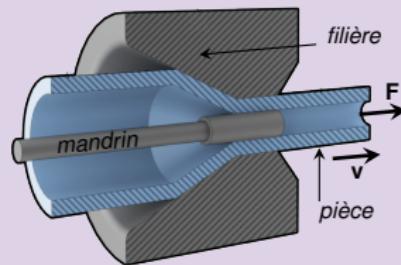
**Tréfilage avec mandrin**

### 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 traitements thermiques sont généralement nécessaires (**pattementage**) .



**Tréfilage simple**

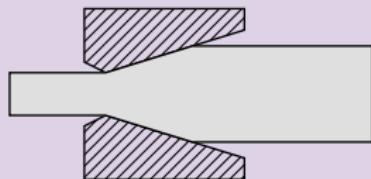


**Tréfilage avec mandrin**

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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*

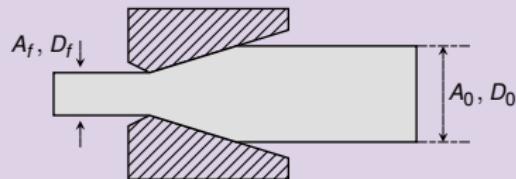
• *Relations physiques*

• *Rapport de tréfilage*

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

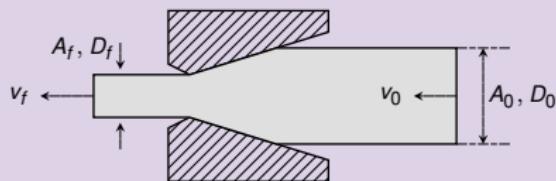
• Relations physiques

• Rapport de tréfilage

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

<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
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



• Relations géométriques

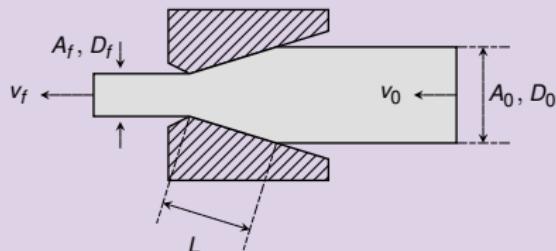
• Relations physiques

• Rapport de tréfilage

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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

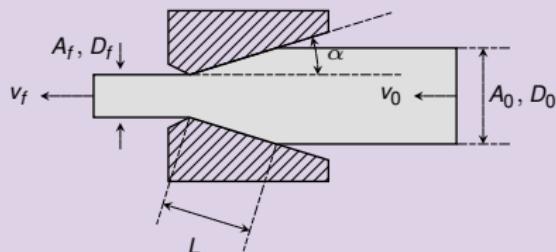


- Relations géométriques
- Relations physiques
- Rapport de tréfilage

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

<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
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- *Relations géométriques*

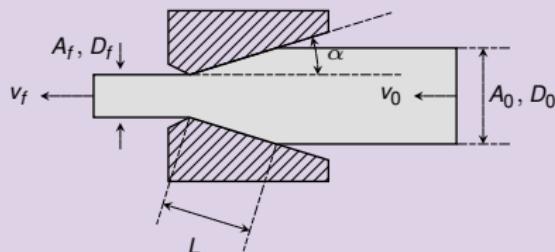
- *Relations physiques*

- *Rapport de tréfilage*

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

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

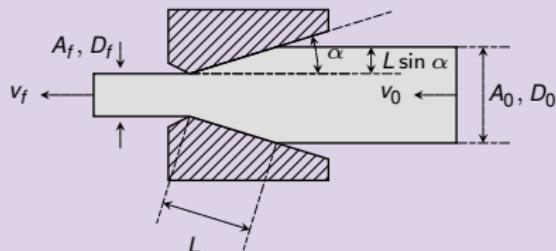
- Relations physiques**

- Rapport de tréfilage**

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

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

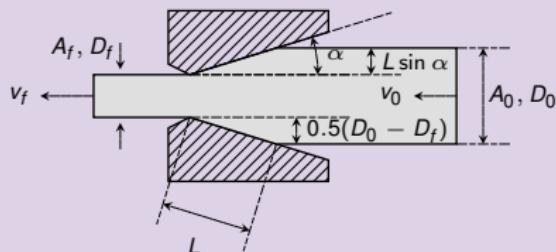
- Relations physiques**

- Rapport de tréfilage**

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

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

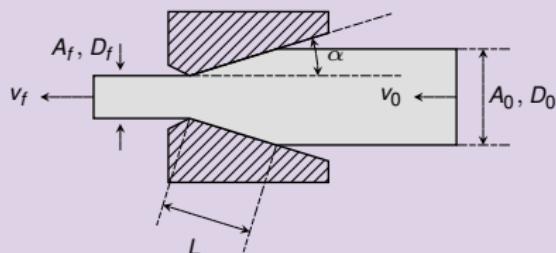
- Relations physiques**

- Rapport de tréfilage**

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

<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
$\alpha$ : $\frac{1}{2}$ angle d'ouverture	rad



- **Relations géométriques**

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

- **Relations physiques**

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

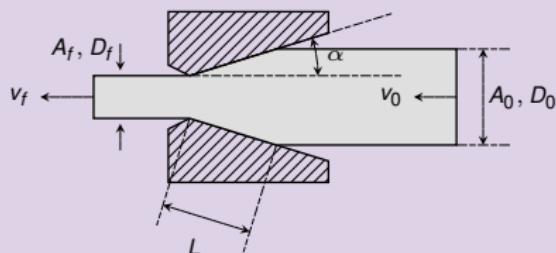
(incompressibilité)

- **Rapport de tréfilage**

### 3.3.7 Tréfilage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$v_f$ : 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**

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

- **Relations physiques**

$$\cdot v_f A_f = v_0 A_0$$

(incompressibilité)

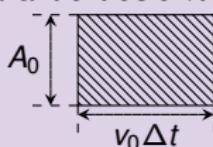
- **Rapport de tréfilage**

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

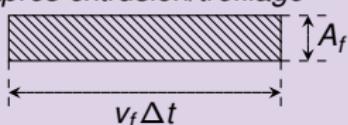
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

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

avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



- Le taux de déformation vaut  $\varepsilon$
- Le travail spécifique de déformation en extrusion/tréfilage est l'aire sur la courbe de traction réelle :

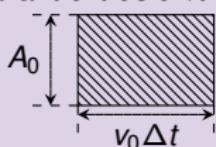


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

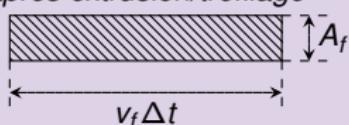
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

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

avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



- Le taux de déformation vaut  $\varepsilon$

- Le travail spécifique de déformation en extrusion/tréfilage est l'aire sur la courbe de traction réelle :

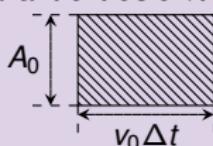


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

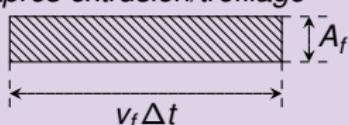
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

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

avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



- Le taux de déformation vaut  $\varepsilon = \ln \frac{v_f \Delta t}{v_0 \Delta t}$

- Le travail spécifique de déformation en extrusion/tréfilage est l'aire sur la courbe de traction réelle :

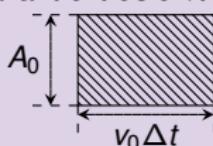


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

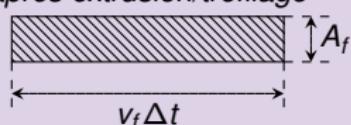
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

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

avant extrusion/tréfilage



après extrusion/tréfilage



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

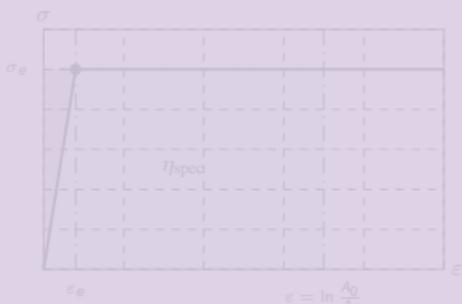


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

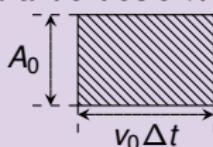
Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

$$\eta_{spca} = \sigma_E \varepsilon_E - \frac{1}{2} \sigma_E \varepsilon_E$$

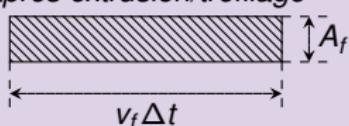
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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/tréfiling est l'aire sur la courbe de traction réelle :

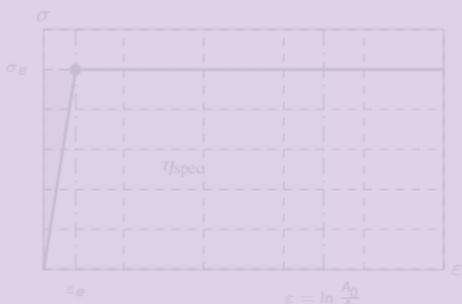


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

Travail spécifique de déformation :

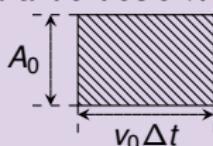
$$\eta_{\text{spéc}} = \sigma_E \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_E^2 \varepsilon$$

Si  $\sigma_E$  est très petit alors  $\eta_{\text{spéc}} \approx \sigma_E \varepsilon$

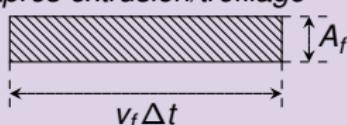
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

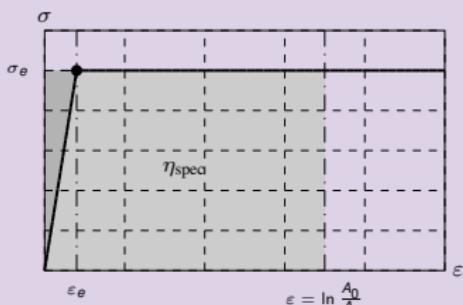


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

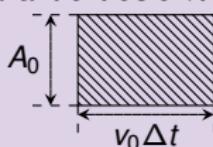
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_y \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y$$

- Si  $\varepsilon_y$  est très petit alors  $\sigma_y \simeq R_y$

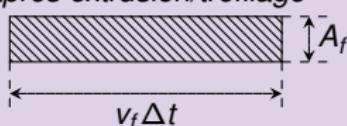
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

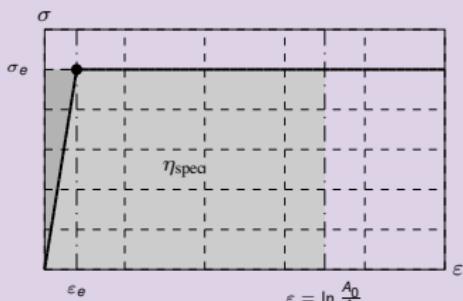


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

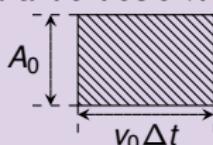
- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon \quad (1)$$

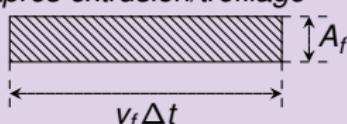
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

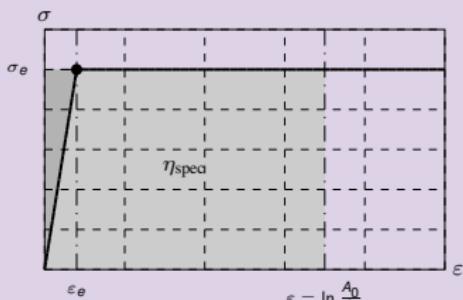


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

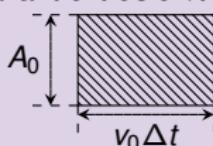
- Si  $\varepsilon_e$  est très petit alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

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

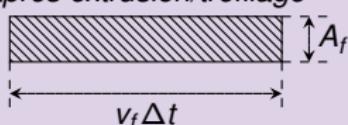
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

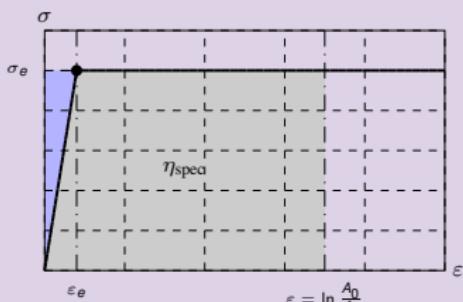


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

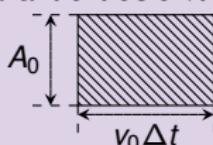
- Si  $\varepsilon_e$  est très petit alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

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

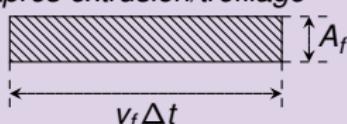
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

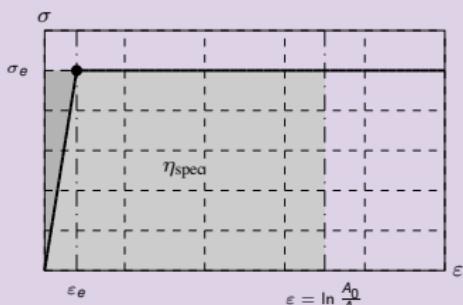


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

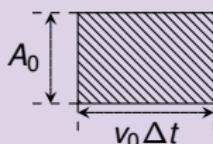
- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

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

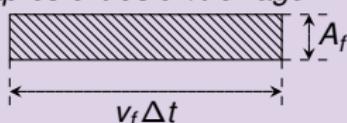
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

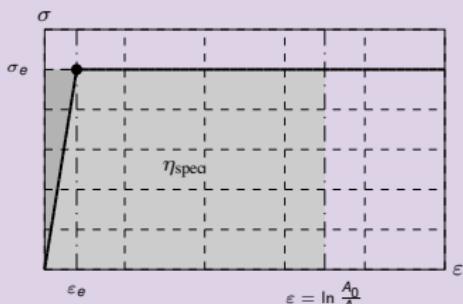


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

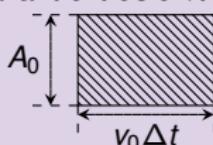
- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

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

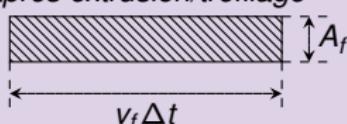
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

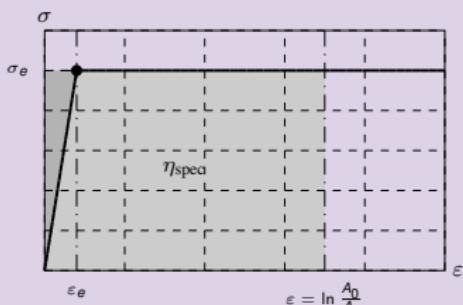


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

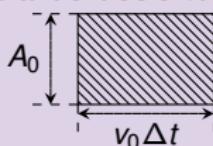
- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

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

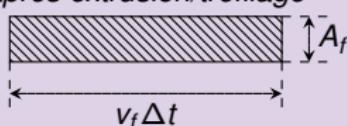
### 3.3.8 Extrusion et tréfilage - travail spécifique

- 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 :

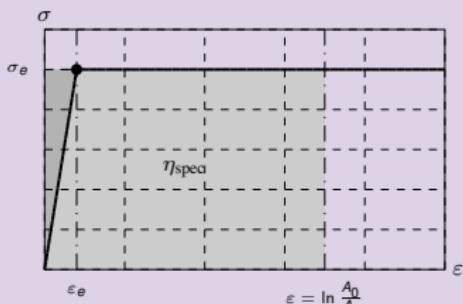


Fig. Courbe de traction réelle pour un corps plastiquement idéal

- Pour un corps **plastiquement idéal** :

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

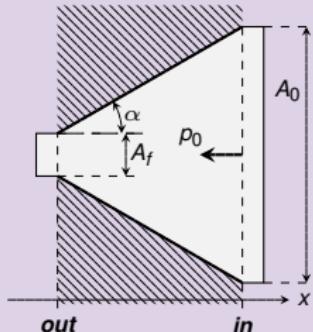
- Si  $\varepsilon_e$  est **très petit** alors  $\sigma_e \simeq R_e$  et :

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

### 3.3.9 Pression et force d'extrusion

#### Situation sans frottement

- On appelle  $p_0$  la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée.

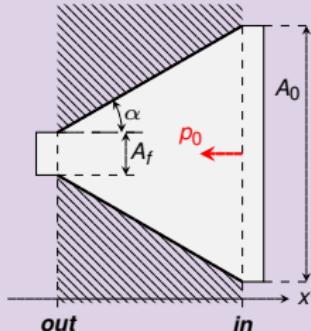


avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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  $F_{\text{extr}} = \dots$ .

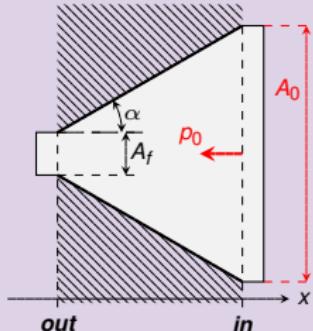


avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 3.3.9 Pression et force d'extrusion

#### Situation sans frottement

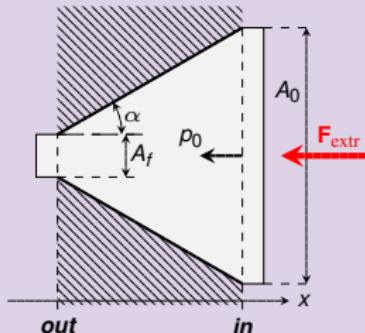
- On appelle  $p_0$  la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_0$ . La force d'extrusion est donc  $F_{\text{extr}} = \dots$ .



avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 3.3.9 Pression et force d'extrusion

#### Situation sans frottement



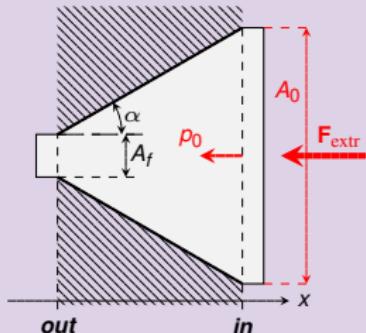
- On appelle  $p_0$  la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_0$ . La force d'extrusion est donc  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = F_{\text{extr}} \cdot v \quad (2)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 3.3.9 Pression et force d'extrusion

#### Situation sans frottement



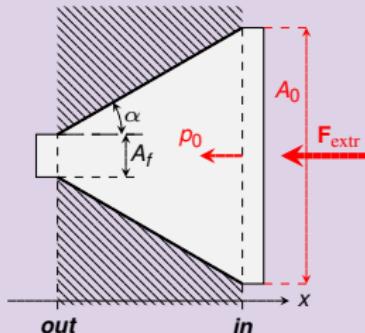
- On appelle  $p_0$  la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_0$ . La force d'extrusion est donc  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = F_{\text{extr}} \cdot v. \quad (2)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 3.3.9 Pression et force d'extrusion

#### Situation sans frottement



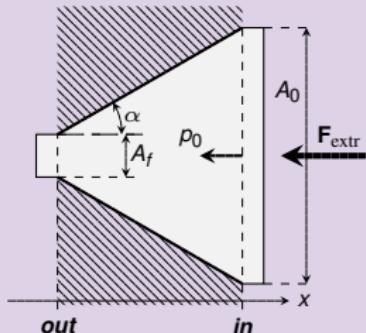
- On appelle  $p_0$  la pression d'extrusion appliquée au flan en entrée. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_0$ . La force d'extrusion est donc  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = F_{\text{extr}} v_{\text{extr}} \quad (2)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (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  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

$$P_{\text{extr}} = F_{\text{extr}} V_0. \quad (2)$$

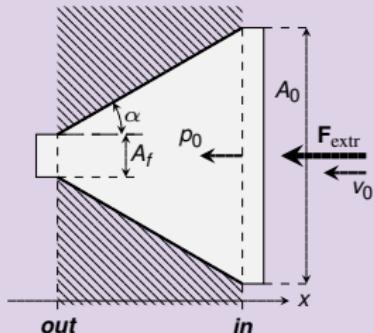
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \quad (3)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (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  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

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

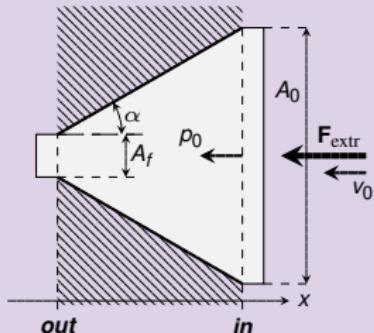
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \quad (3)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (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  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

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

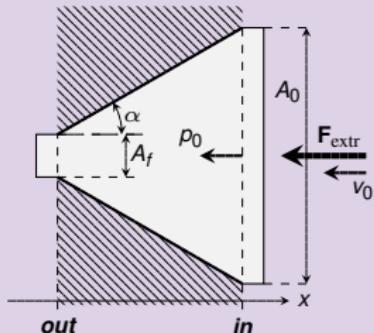
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} \cdot \dots \quad (3)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (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  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

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

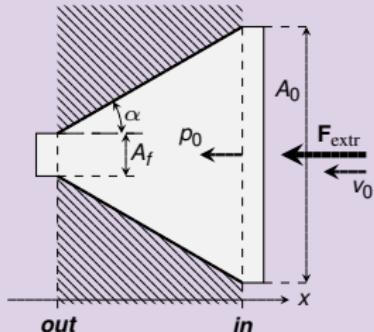
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

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

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (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  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

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

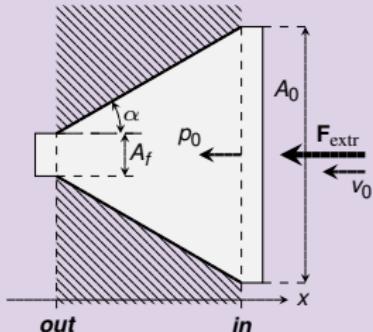
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

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

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (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  $F_{\text{extr}} = p_0 A_0$ . La puissance d'extrusion vaut

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

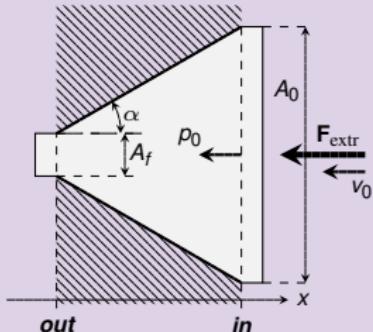
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

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

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée.

### 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

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

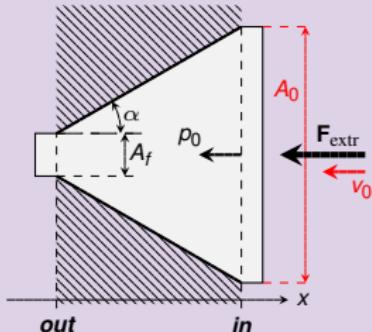
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} \times \text{Débit} \quad (3)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée.

### 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

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

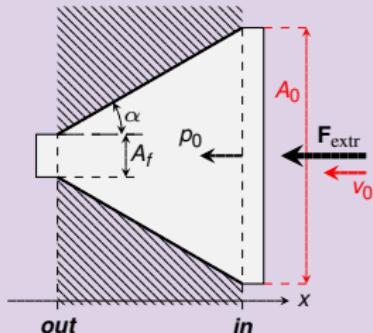
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} \times \text{Débit} \quad (3)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée.

### 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 :

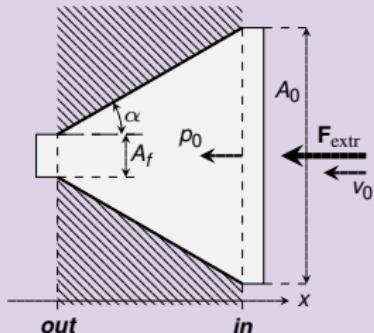
$$P_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} A_0 v_0 \quad (3)$$

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  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$

$$\eta_{\text{spec}} = -P_0 \ln \gamma \quad (\text{Principe d'entropie})$$

### 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 :

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

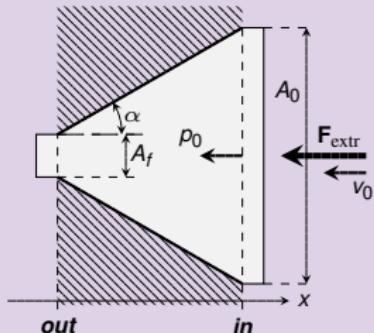
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport d'extrusion :

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

$$F_{\text{extr}} = \eta_{\text{spec}} A_0 v_0 \quad (\text{Force d'extrusion}) \quad (5)$$

### 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 :

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

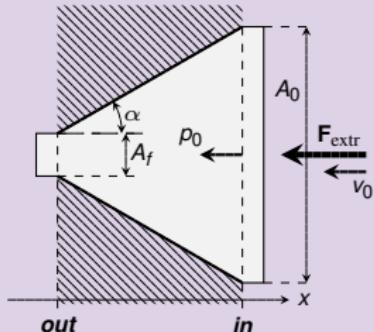
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport d'extrusion :

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

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

### 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 :

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

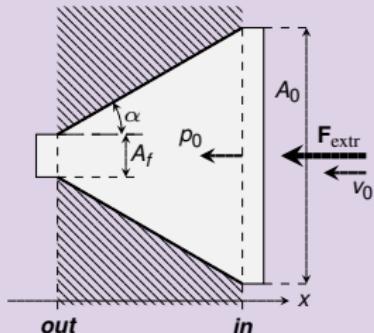
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport d'extrusion :

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

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

### 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 :

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

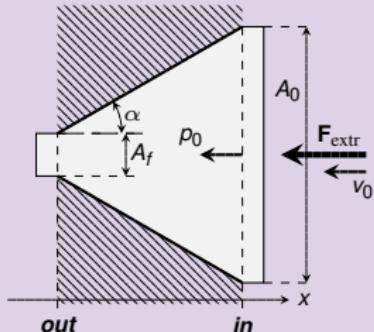
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport d'extrusion :

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

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

### 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 :

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

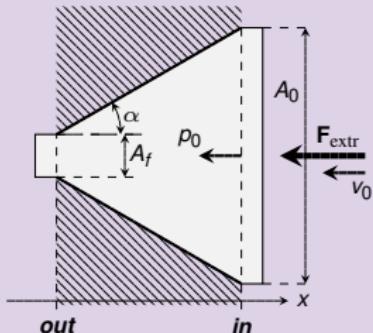
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_0 v_0$  le débit de mat. extrudée. Les équations (2)-(3) impliquent  $p_0 = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport d'extrusion :

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

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

### 3.3.9 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 :

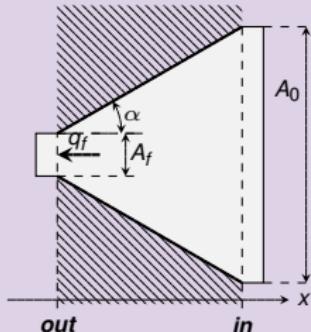
$$p_0 = -R_e \ln r \quad (\textbf{Pression d'extrusion}) \quad (4)$$

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

### 3.3.10 Traction et force de tréfilage

#### Situation sans frottement

- On appelle  $q_t$  la traction de tréfilage appliquée au flan en sortie. Celle-ci permet de déterminer la force de tréfilage.

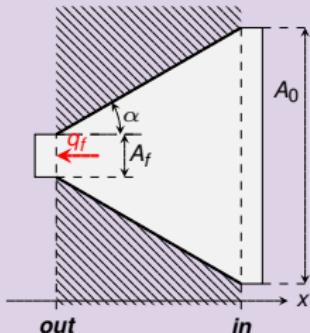


avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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  $F_{\text{tref}} = \dots$ .

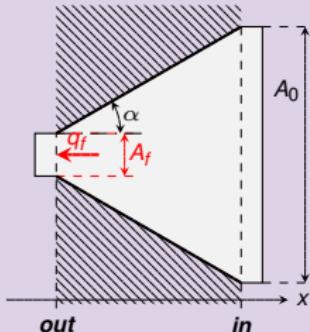


avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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  $F_{\text{trf}} = \dots$ .

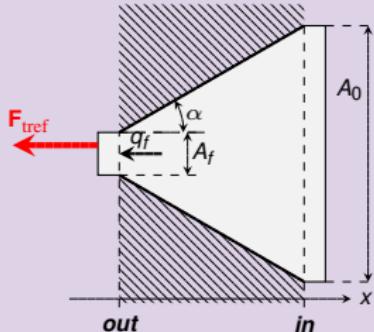


avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

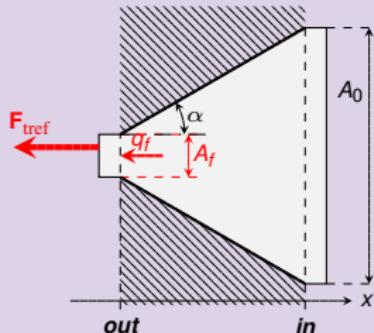


$$P_{\text{tref}} = F_{\text{tref}} \cdot v \quad (6)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 3.3.10 Traction et force de tréfilage

#### Situation sans frottement



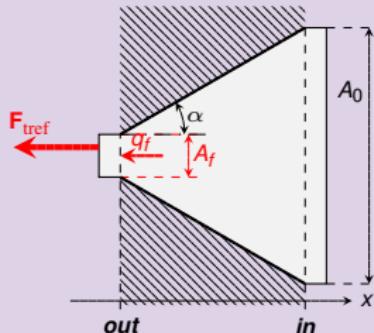
- On appelle  $q_f$  la traction de tréfilage appliquée au flan en sortie. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_f$ . La force de tréfilage est donc  $F_{\text{tref}} = q_f A_f$ . La puissance de tréfilage vaut

$$P_{\text{tref}} = F_{\text{tref}} \cdot v \quad (6)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 3.3.10 Traction et force de tréfilage

#### Situation sans frottement



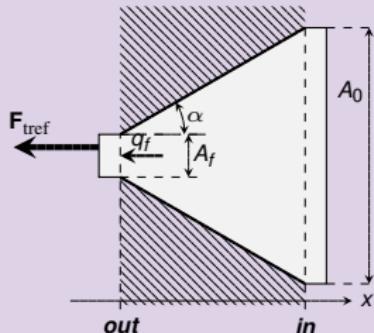
- On appelle  $q_f$  la traction de tréfilage appliquée au flan en sortie. Cette quantité est à peu-près constante sur la section  $A_f$ . La force de tréfilage est donc  $F_{\text{tref}} = q_f A_f$ . La puissance de tréfilage vaut

$$P_{\text{tref}} = F_{\text{tref}} \cdot v \quad . \quad (6)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

$$P_{\text{tref}} = F_{\text{tref}} V_f. \quad (6)$$

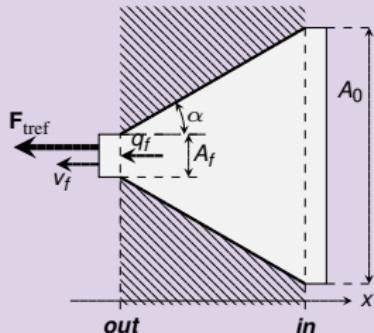
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} \cdot \dots \quad (7)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

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

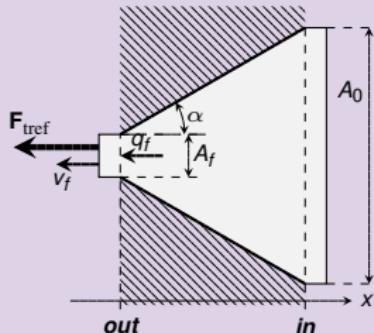
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \quad (7)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

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

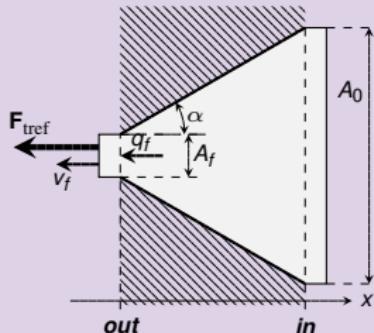
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} \cdot \dots \quad (7)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

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

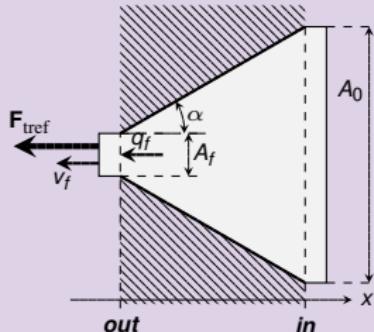
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

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

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

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

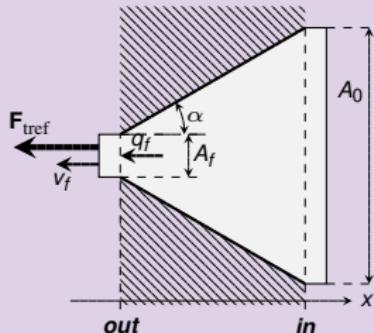
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

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

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1)

### 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

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

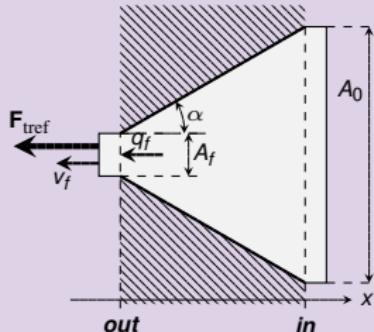
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

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

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée.

### 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

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

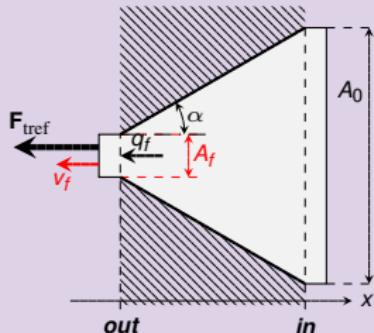
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} \times \text{Débit} \quad (7)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée.

### 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

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

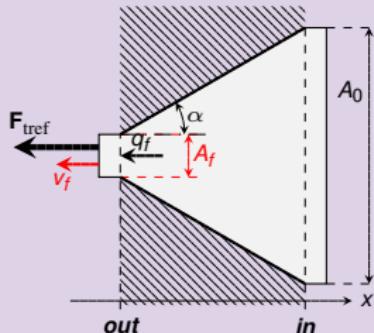
Sans frottements, cette puissance est dissipée en travail de déformation :

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} \times \text{Débit} \quad (7)$$

avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations

### 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  $q_f = \eta_{\text{spec}}$

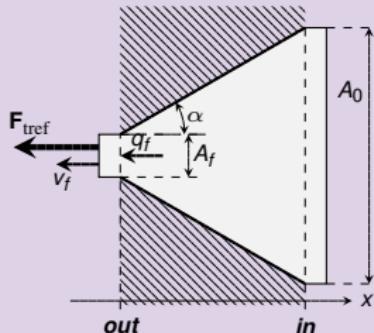
$$\eta_{\text{spec}} = -P_{\text{tref}}/v_f \quad (\text{Traction de déformation})$$

(8)

(9)

### 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 :

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

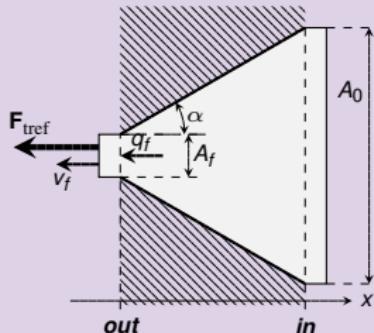
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent  $q_f = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport de tréfilage :

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

$$P_{\text{tref}} = \eta_{\text{spec}} A_f v_f \quad (\text{Travail de déformation}) \quad (9)$$

### 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 :

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

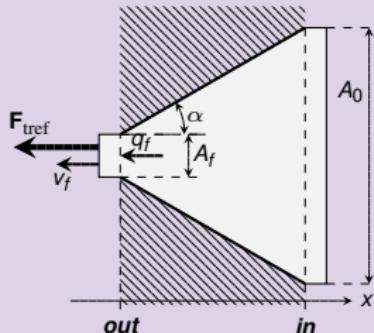
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent  $q_f = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport de tréfilage :

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

$$F_{\text{tref}} = \dots \quad (\text{Force de tréfilage}) \quad (9)$$

### 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 :

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

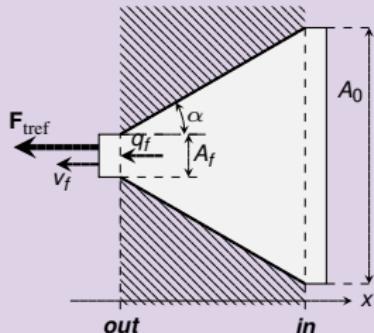
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent  $q_f = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport de tréfilage :

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

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

### 3.3.10 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 :

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

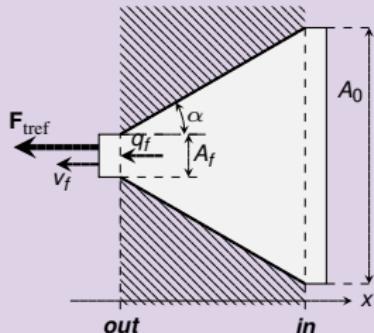
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent  $q_f = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport de tréfilage :

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

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

### 3.3.10 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 :

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

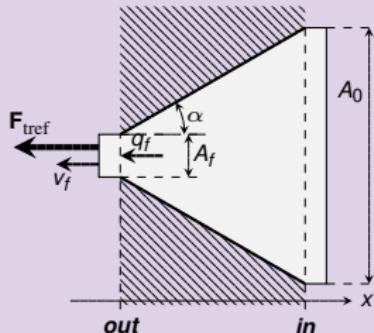
avec  $\eta_{\text{spec}}$  le travail spécifique de déformation (1) et  $A_f v_f$  le débit de mat. tréfilée. Les équations (6)-(7) impliquent  $q_f = \eta_{\text{spec}}$  soit avec  $r = \frac{A_f}{A_0}$ , le rapport de tréfilage :

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

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

### 3.3.10 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 :

$$p_0 = \begin{cases} \dots \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad (\text{Press. d'extrusion}) \quad (10)$$

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

$$q_f = \begin{cases} \dots \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$

► Théorie des frottements coulombiens

### 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 :

$$p_0 = \begin{cases} R_e \left( 1 + \frac{R_e}{2r} \right) \left( 1 - \frac{2r}{R_e} \right) & \text{si } \mu \geq 0 \\ -R_e \ln r, & \text{si } \mu = 0 \end{cases} \quad (\text{Press. d'extrusion}) \quad (10)$$


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

$$q_f = \begin{cases} & \\ & \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$


### 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) :

$$q_f = \begin{cases} & \\ & \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$

### 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) :

$$q_f = \begin{cases} & \\ & \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$

### 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) :

$$q_f = \begin{cases} & \\ & \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$

### 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) :

$$q_f = \begin{cases} & \\ & \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$

### 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) :

$$q_f = \begin{cases} & \\ & \end{cases} \quad (\text{Tract. de tréfilage}) \quad (11)$$

▶ aux tabl.

### 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) :

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

### 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) :

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

### 3.3.11 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) :

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

### 3.3.11 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) :

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

### 3.3.11 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) :

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

▶ aux tabl.

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = F_{\text{extr}} v_0 \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = F_{\text{tréf.}} v_f \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = F_{\text{extr}} v_0 \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = F_{\text{tréf.}} v_f \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = v_0 A_0 p_0 \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = F_{\text{tréf.}} v_f \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = v_0 A_0 p_0 \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = F_{\text{tréf.}} v_f \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = v_0 A_0 p_0 \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = F_{\text{tréf.}} v_f \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

$$P_{\text{extr}} = v_0 A_0 p_0 \quad \text{et} \quad P_{\text{tréf.}} = v_f A_f q_f \quad (13)$$

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée,*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *Comme  $v_0 A_0$  et  $v_f A_f$  sont les débits de matière extrudée ou tréfilée, les puissances sont les puissances de masse. Ces puissances sont égales à la puissance dissipée par unité de temps dans le filtre et dans le filtreur.*
- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *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 :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *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 :*



### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *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) :*

### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *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) :  $F_{\text{extr}} > F_{\text{tréf.}}$*

### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *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) :  $F_{\text{extr}} \gg F_{\text{tréf.}}$ .*

### 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  $p_0$  :*

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

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

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

- *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) :  $F_{\text{extr}} \gg F_{\text{tréf.}}$ .*

### 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 dissipée par les deux procédés n'est pas que dissipée en déformation mais aussi en traction.*

- *En tréfilage, il faut éviter que la traction de tréfilage (une traction) passe au-dessus de la limite élastique du matériau.*
- *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.*

### 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 que dissipée en déformation mais aussi en chaleur.*

- *En tréfilage, il faut éviter que la traction de tréfilage (une traction) passe au-dessus de la limite élastique du matériau.*

- *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.*

### 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 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.*

- *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.*

### 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 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. Cela peut entraîner un phénomène de décollement appelleu qui consiste à laisser échapper une partie de la matière entre la lopin et la filière.*
- *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.*

### 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 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.*
- *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.*

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :

$$\frac{q_f}{R_e} = \frac{\mu \tan \alpha}{1 - \mu \tan \alpha} \quad \text{(condition de tréfilage)} \quad (16)$$

- 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.

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :*

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

- *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.*

Condition de tréfilage, Tableaux 5

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :

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

- 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.

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :*

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

- *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.*

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :

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

- 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.

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :

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

- 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.

### 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 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  $\mu$  et au demi-angle d'ouverture  $\alpha$  :*

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

- *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.*

Que faire pour tréfiler à des rapports  $r \ll \frac{1}{e}$  ? Film : TrefilageMultiFilières

### 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 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.*

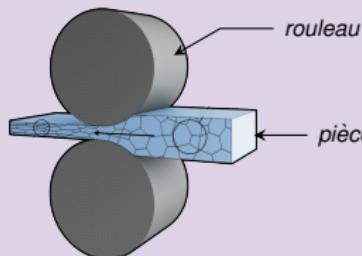
- *En tréfilage, il faut éviter que la traction de tréfilage (une traction) passe au-dessus de la limite élastique du matériau. Si  $q_f > R_e$  alors un phénomène de striction apparaît qui conduit à une perte de contact entre le lopin et la filière. La condition qui évite ce problème est liée au coefficient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

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

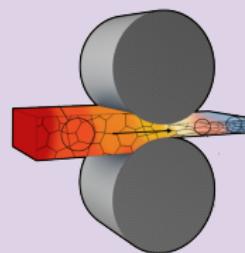
- *En extrusion, la matière n'est pas étirée depuis l'avant mais comprimée depuis l'arrière. Il ne peut donc pas y avoir de perte de contact entre le lopin et la filière et **aucune condition** ne limite les rapports d'extrusion possibles.*

### 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.



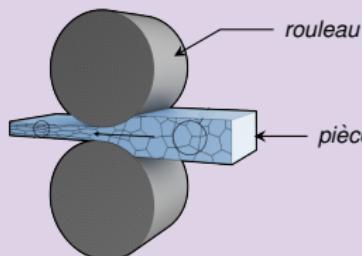
**Laminage à froid**



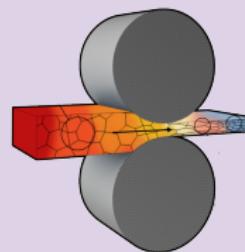
**Laminage à chaud**

### 3.4.1 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.



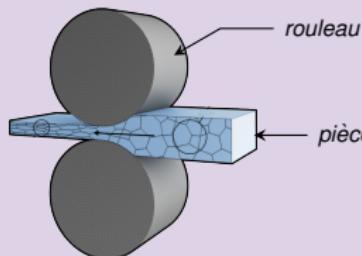
**Laminage à froid**



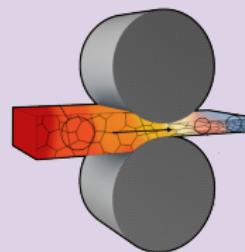
**Laminage à chaud**

### 3.4.1 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**

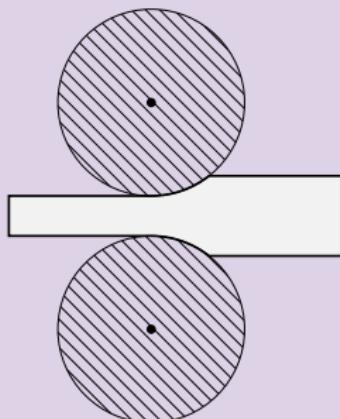


**Laminage à chaud**

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$\omega_0$ : vitesse ang. du rouleau	rad/s
$v_d$ : vitesse du rouleau	mm/s
$\theta$ : angle de contact	rad
$L$ : longueur de contact	mm

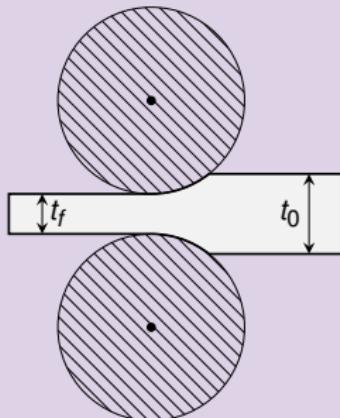


- *Relations géométriques*
- *Relations physiques*
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

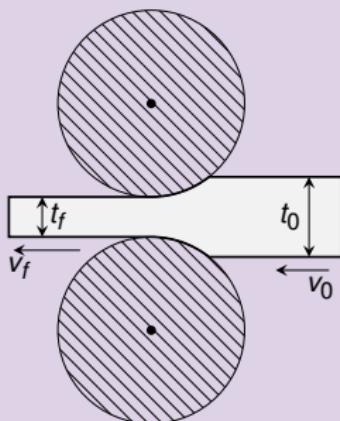


- *Relations géométriques*
- *Relations physiques*
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

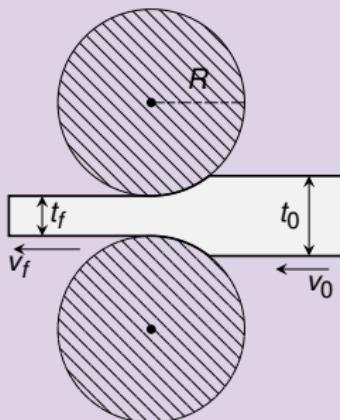


- *Relations géométriques*
- *Relations physiques*
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

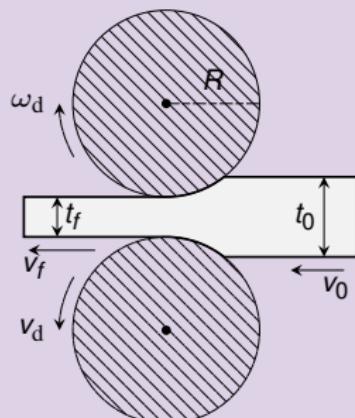


- *Relations géométriques*
- *Relations physiques*
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

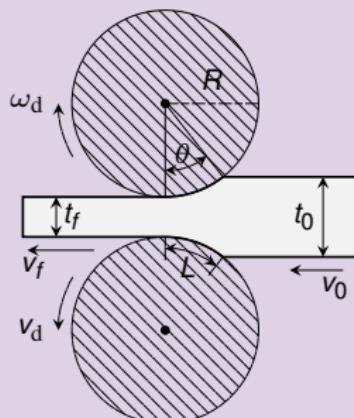


- *Relations géométriques*  
 $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
- *Relations physiques*
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

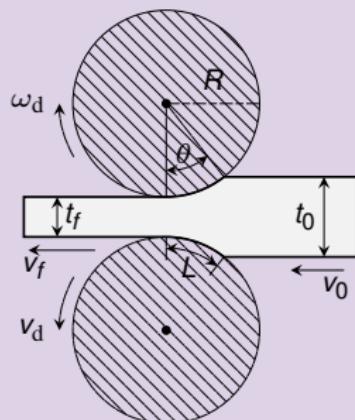


- *Relations géométriques*  
 $t_f = \omega_d R, L = \theta R$
- *Relations physiques*  
 $v_f = v_0 \Rightarrow v_0/v_f = \text{vitesse d'écoulement}$
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

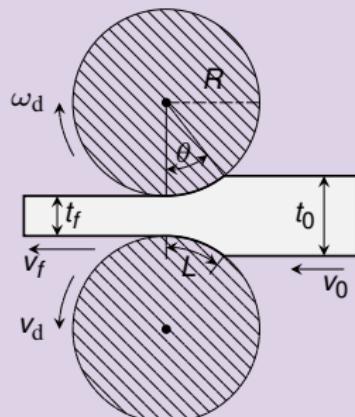


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$ ,
- **Relations physiques**
  - $v_d = v_0 \Rightarrow v_0 = v_d / \cos \theta$  (vitesse d'écoulement)
- **Rétrec., facteur de laminage**

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

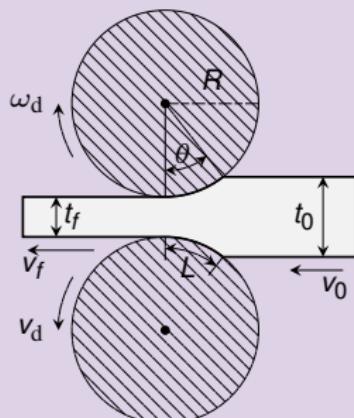


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \approx \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
  - Rétrec., facteur de laminage

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

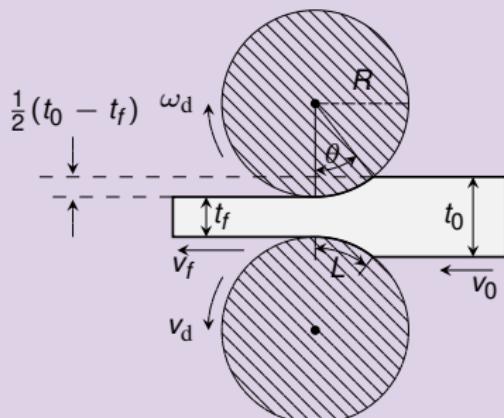


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \approx \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
  - Rétrec., facteur de laminage

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

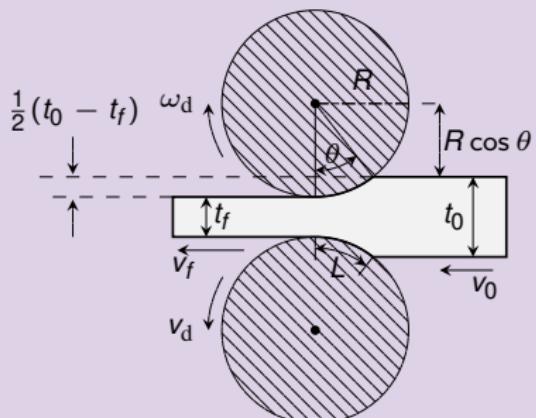


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$   
$$\theta \approx \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- *Rétrec., facteur de laminage*

## 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

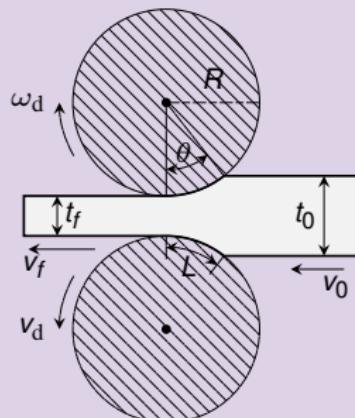


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \approx \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
  - Rétrec., facteur de laminage

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

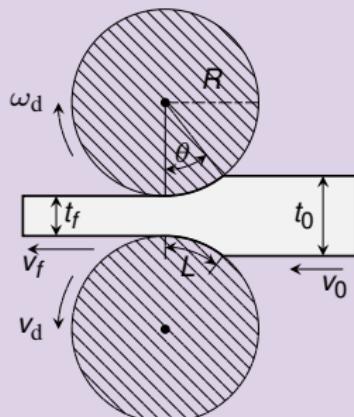


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- *Rétrec., facteur de laminage*

## 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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



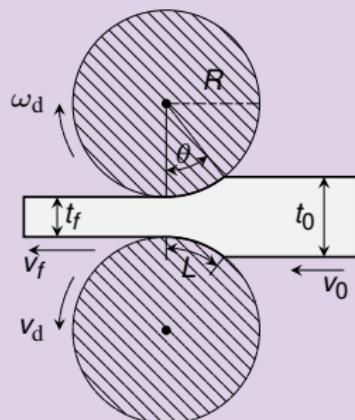
- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \approx \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- *Rétrec., facteur de laminage*

$$\cos \theta \approx 1 - \frac{1}{2} \theta^2$$

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

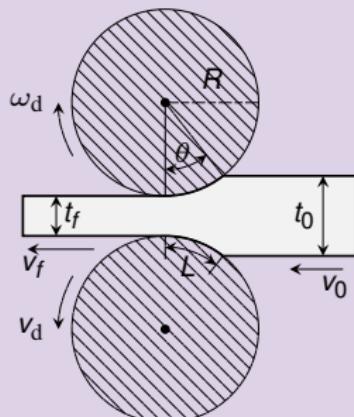


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

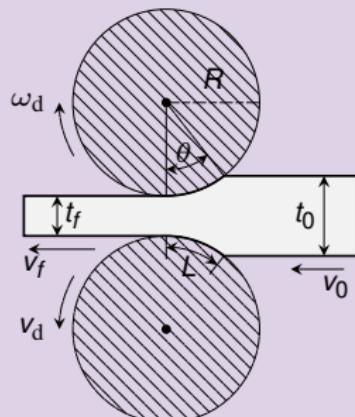


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- *Rétrec., facteur de laminage*

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

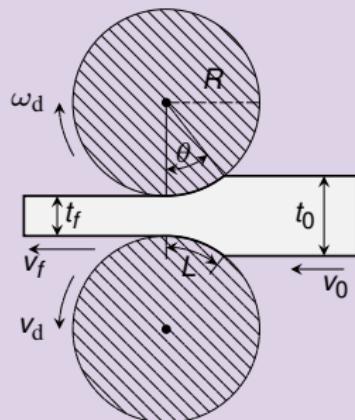


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- **Rétrec., facteur de laminage**
  - $\delta = t_0 - t_f$
  - $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

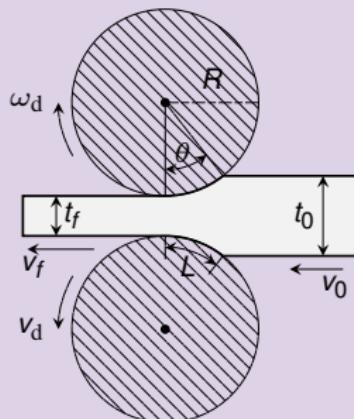


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- **Rétrec., facteur de laminage**
  - $\delta = t_0 - t_f$
  - $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$

## 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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



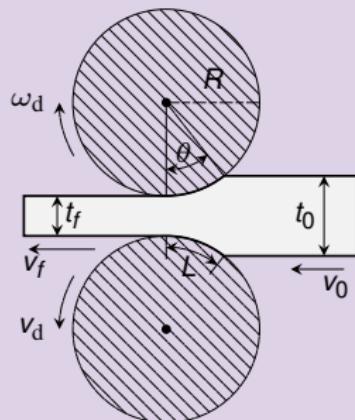
- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (*incompr.*)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- **Rétrec., facteur de laminage**
  - $\delta = t_0 - t_f$
  - $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$

► diverses formules aux Tableaux

### 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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

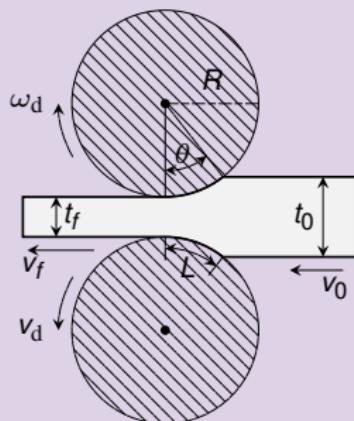


- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- **Rétrec., facteur de laminage**
  - $\delta = t_0 - t_f$
  - $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$

## 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

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



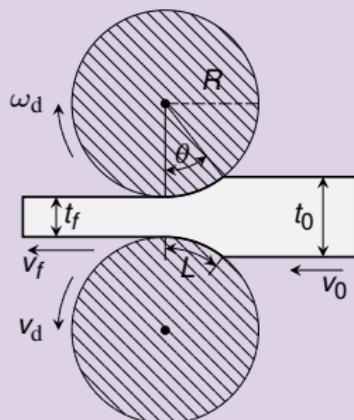
- **Relations géométriques**
  - $v_d = \omega_d R, L = \theta R$
  - $\frac{1}{2}(t_0 - t_f) = R(1 - \cos \theta)$
  - $\theta \simeq \sqrt{\frac{t_0 - t_f}{R}}, L \simeq \sqrt{R(t_0 - t_f)}$
- **Relations physiques**
  - $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  (incompr.)
  - En gén.,  $\theta$  est petit ( $< 20^\circ$ )
- **Rétrec., facteur de laminage**
  - $\delta = t_0 - t_f$
  - $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$

Est-ce que la formule  $v_f t_f w_f = v_0 t_0 w_0$  est vraiment valable si le matériau a un coeff. de Poisson  $\nu < 0.5$  ?

## 3.4.2 Laminage - schéma et nomenclature

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

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$\omega_d$ : 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 ( $< 20^\circ$ )
- **Rétrec., facteur de laminage**
  - $\delta = t_0 - t_f$
  - $r = \frac{\delta}{t_0} = 1 - \frac{t_f}{t_0}$

Oui car l'état de sortie est un état de déf. perm. qui ne modifie pas le volume !

### 3.4.3 Laminage - travail spécifique

- La déformation induite par le laminage est essentiellement une compression.
- Le taux de compression réel vaut  $\varepsilon$
- Le travail spécifique de déformation en laminage est l'aire sous la courbe de compression réelle.

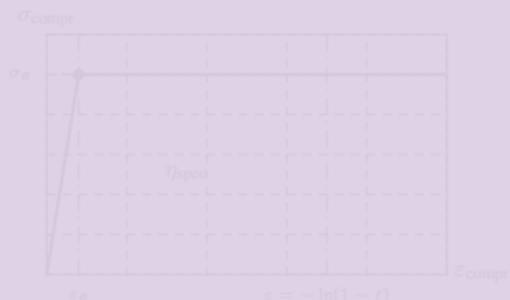
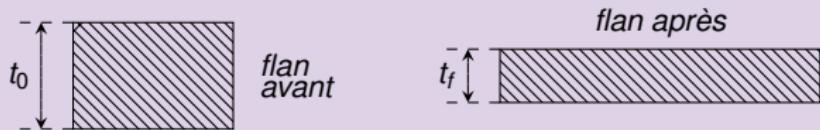


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

### 3.4.3 Laminage - travail spécifique

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



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

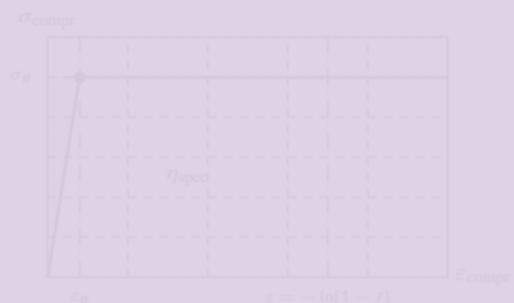
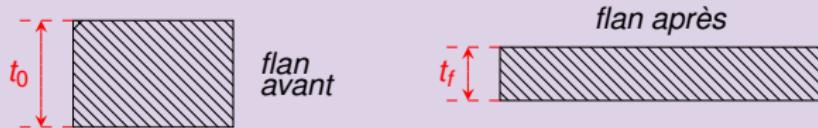


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

### 3.4.3 Laminage - travail spécifique

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



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

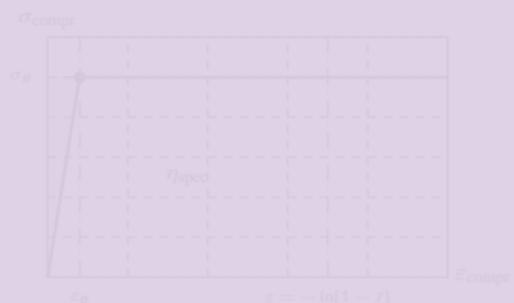
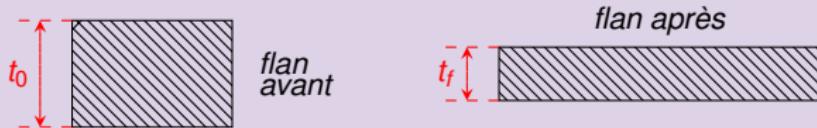


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

### 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.

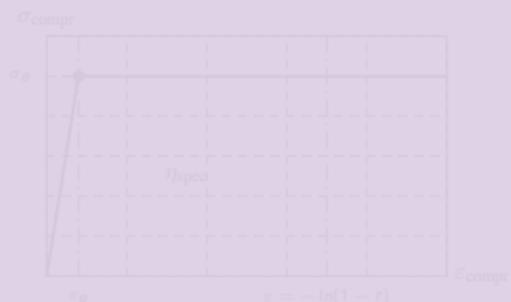
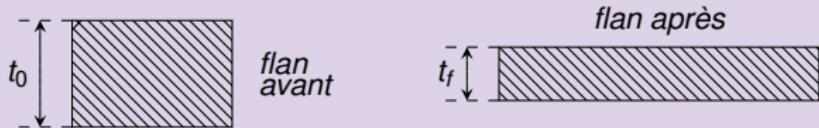


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

### 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.

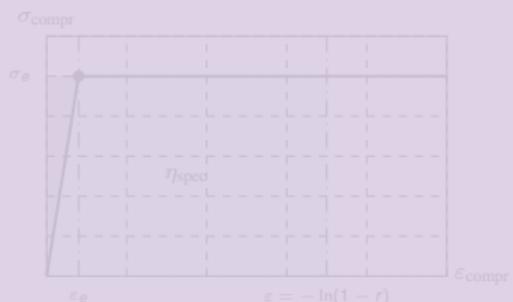
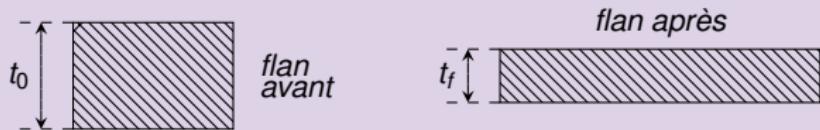


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

### 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.

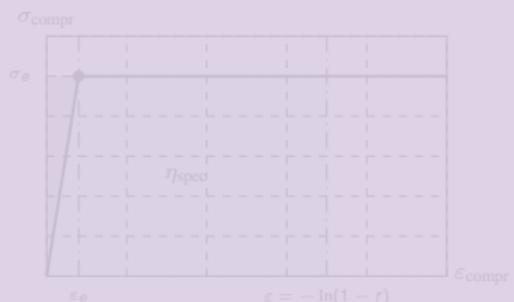


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un métal soumis à une compression réelle

Travail spécifique

élastique

plastique

total

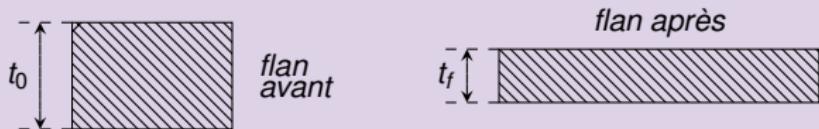
élastique

plastique

total

### 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.

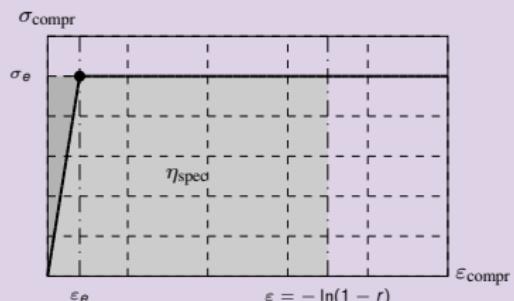


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

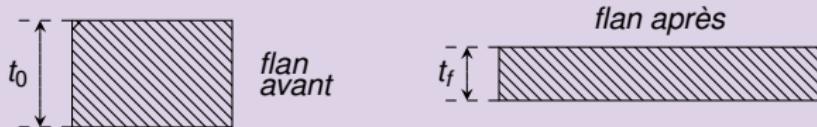
Pour un matériau *plastiquement idéal* :

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

Si  $\varepsilon_e$  est très petit alors  $\sigma_e \simeq R_e$

### 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.

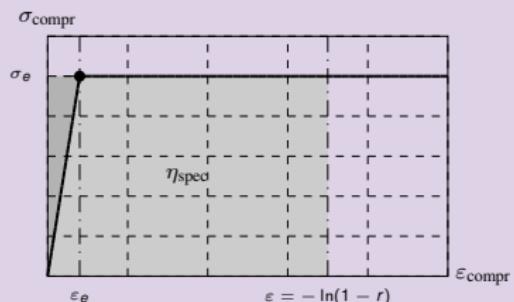


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

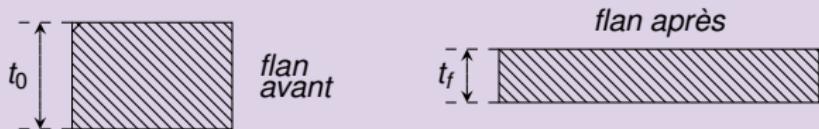
Pour un matériau **plastiquement idéal** :

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

Si  $\varepsilon_e$  est très petit alors  $\sigma_e \simeq R_e$

### 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.

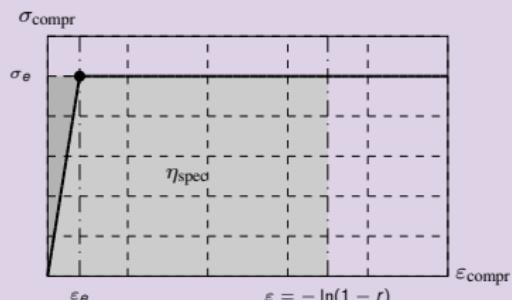


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un matériau **plastiquement idéal** :

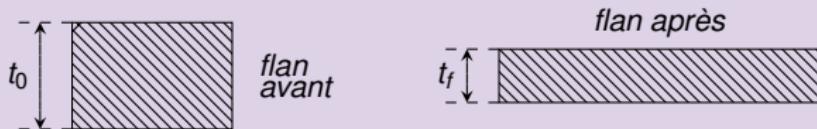
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

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

$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon \quad (17)$$

### 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.

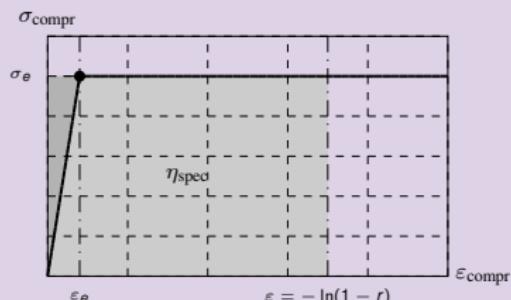


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un matériau **plastiquement idéal** :

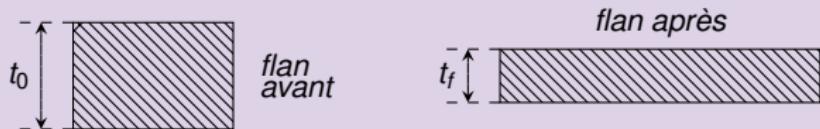
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

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

$$\eta_{\text{spec}} \simeq R_e \varepsilon \quad (17)$$

### 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.

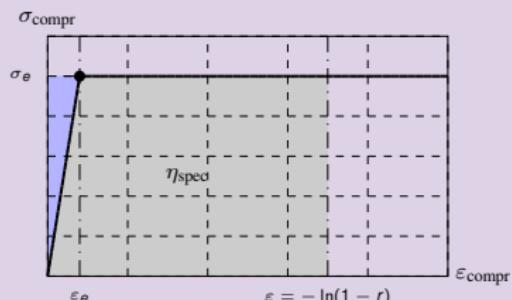


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un matériau **plastiquement idéal** :

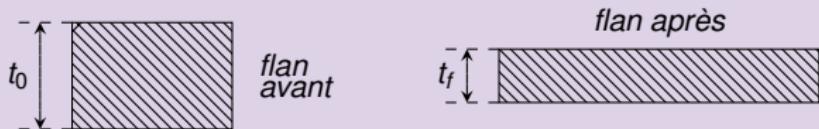
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

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

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

### 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.

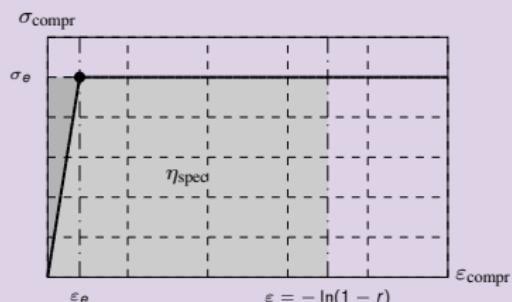


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un matériau **plastiquement idéal** :

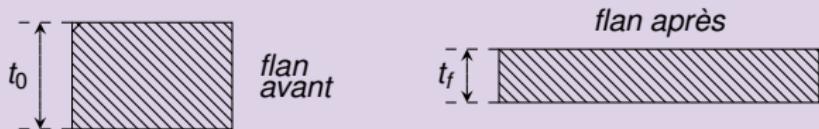
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

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

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

### 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.

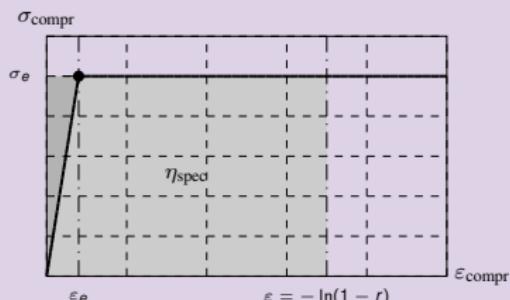


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un matériau **plastiquement idéal** :

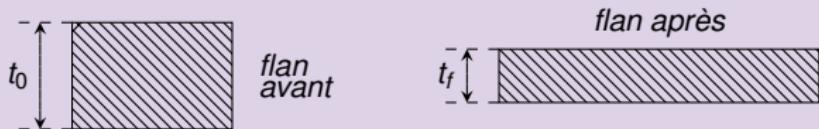
$$\eta_{\text{spec}} = \sigma_e \varepsilon - \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e$$

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

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

### 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.

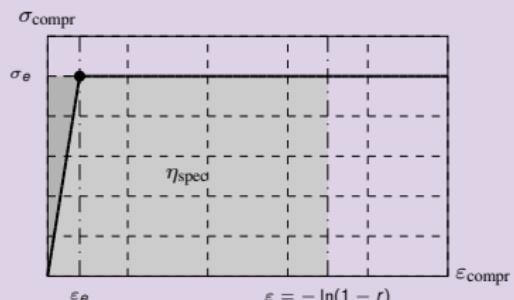


Fig. Graphe de compression réel pour un corps plastiquement idéal

Pour un matériau **plastiquement idéal** :

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

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

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

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

## 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

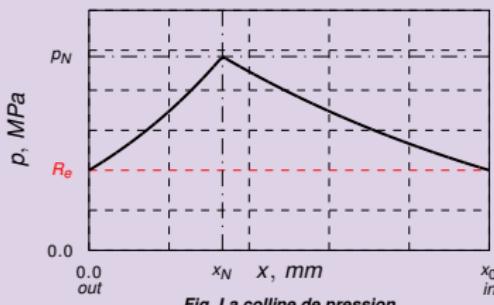


Fig. La colline de pression

- 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'un abscisse  $x_N$  appelé point neutre.

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

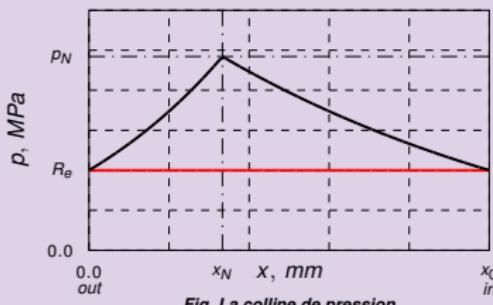


Fig. La colline de pression

- 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'un abscisse  $x_N$  appelé point neutre.

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

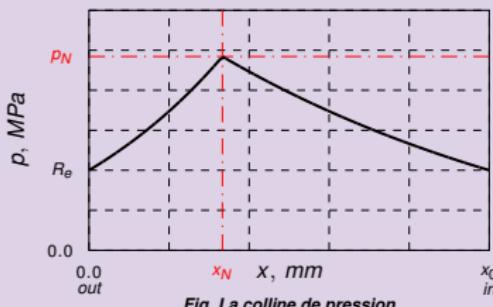


Fig. La colline de pression

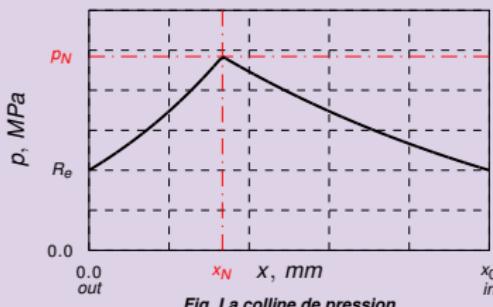
- Les rouleaux exercent en outre une pression  $p$  sur le flan. Elle est égale à la limite élastique du lopin en entrée et en sortie et maximale à la hauteur d'un abscisse  $x_N$  appelé point neutre.

### 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  $\delta = t_0 - t_f$  :

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

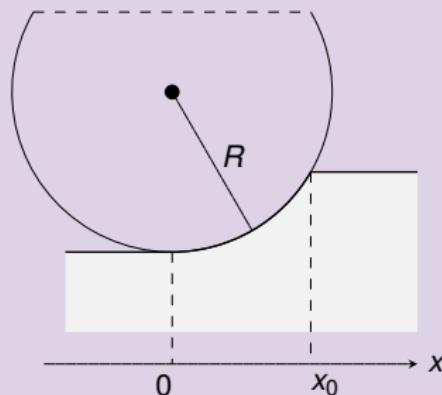


- Les rouleaux exercent en outre une pression  $p$  sur le flan. Elle est égale à la limite élastique du lopin en entrée et en sortie et maximale à la hauteur d'un abscisse  $x_N$  appelé point neutre.

## 3.4.5 Laminage

### Force et moment de laminage

- Les axes des rouleaux subissent un effort radial appelé force de laminage notée  $F_{\text{lam}}$ . 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 :



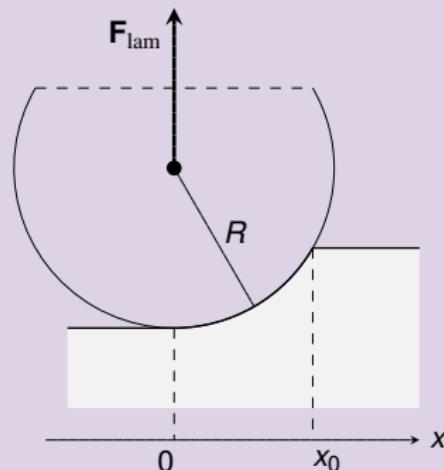
$$F_{\text{lam}} \simeq wR_e \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (19)$$

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

### 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 :

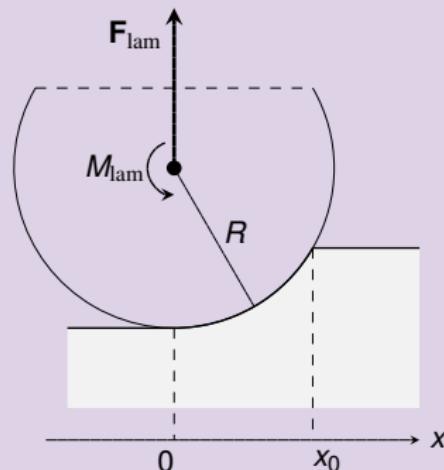
$$F_{\text{lam}} \simeq wR_e \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (19)$$

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

### 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 :

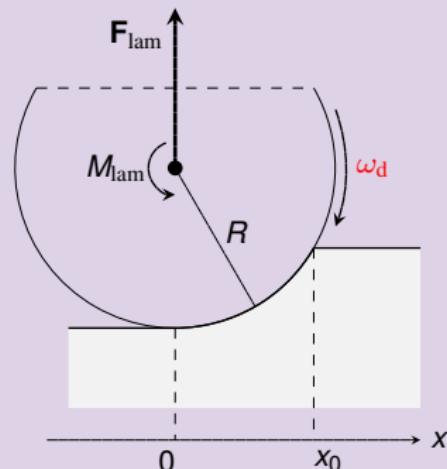
$$F_{\text{lam}} \simeq wR_e \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (19)$$

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

## 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 :

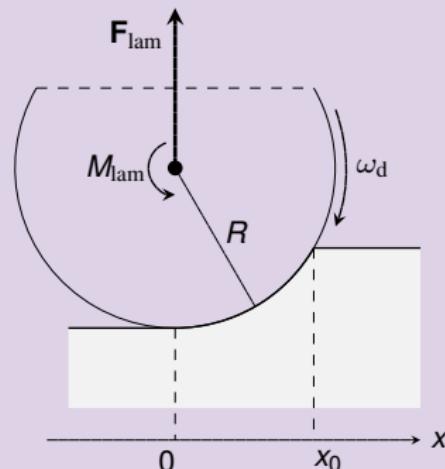
$$F_{\text{lam}} \simeq wR_e \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad (19)$$

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

### 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.



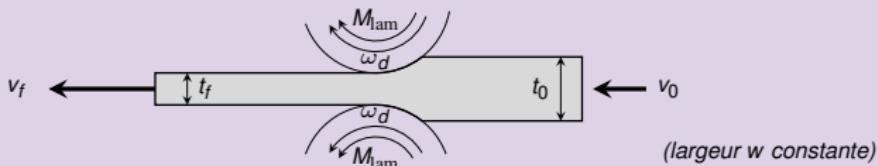
- Les formules suivantes permettent d'estimer ces quantités :

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

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

## 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  $r = \frac{t_0 - t_f}{t_0}$  :

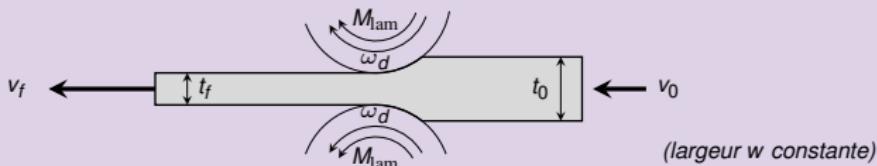
$$v_0 = -\frac{r}{\ln(1-r)} v_d \quad (\text{vitesse d'entrée}) \quad (22)$$

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

- 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. trsp. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

## 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  $r = \frac{t_0 - t_f}{t_0}$  :

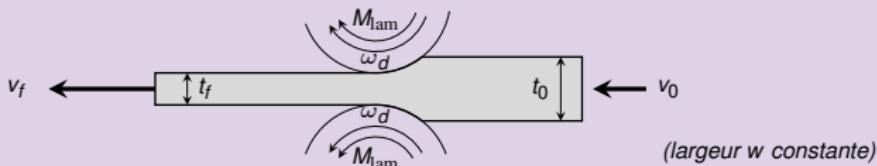
$$v_0 = -\frac{r}{\ln(1-r)} v_d \quad (\text{vitesse d'entrée}) \quad (22)$$

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

- 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. trsp. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

## 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  $r = \frac{t_0 - t_f}{t_0}$  :

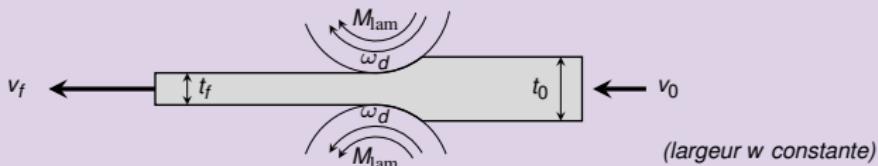
$$v_0 = -\frac{r}{\ln(1-r)} v_d \quad (\text{vitesse d'entrée}) \quad (22)$$

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

- 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. trsp. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

## 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  $r = \frac{t_0 - t_f}{t_0}$  :

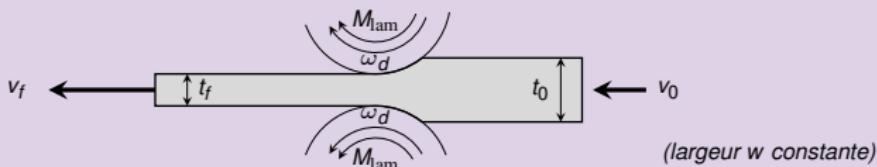
$$v_0 = -\frac{r}{\ln(1-r)} v_d \quad (\text{vitesse d'entrée}) \quad (22)$$

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

- 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. trsp. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

## 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  $r = \frac{t_0 - t_f}{t_0}$  :

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

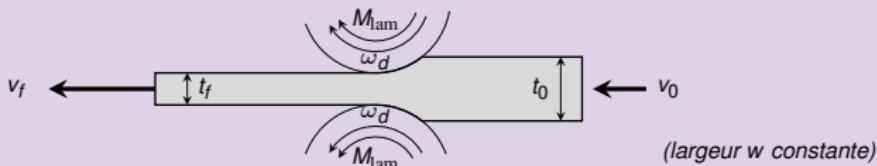
$$v_f = -\frac{r}{(1-r) \ln(1-r)} v_d \quad (\text{vitesse de sortie}) \quad (23)$$

- 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. trsp. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

▶ Colline de pression et vitesse de laminage

## 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. trsp. 3.4.4) :  $v_N = v_d$ .

### 3.4.7 Laminage - défauts

*Ondulations*



*Fissures de surface*



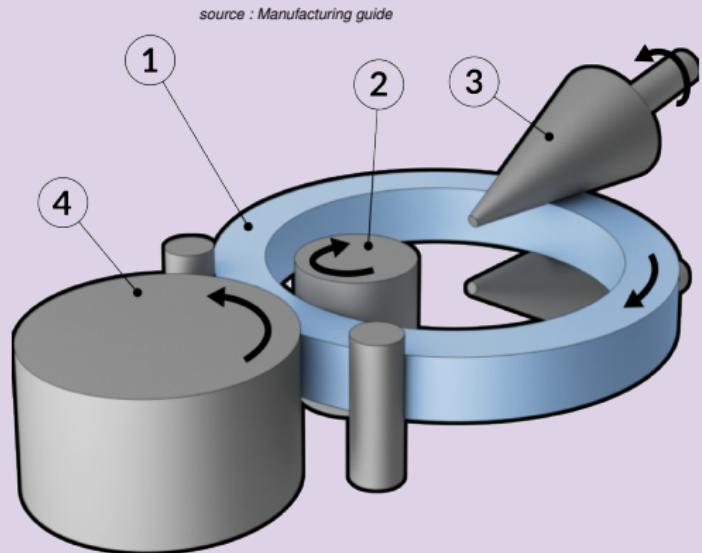
*Fissures de côté*



*Effet d'alligator*

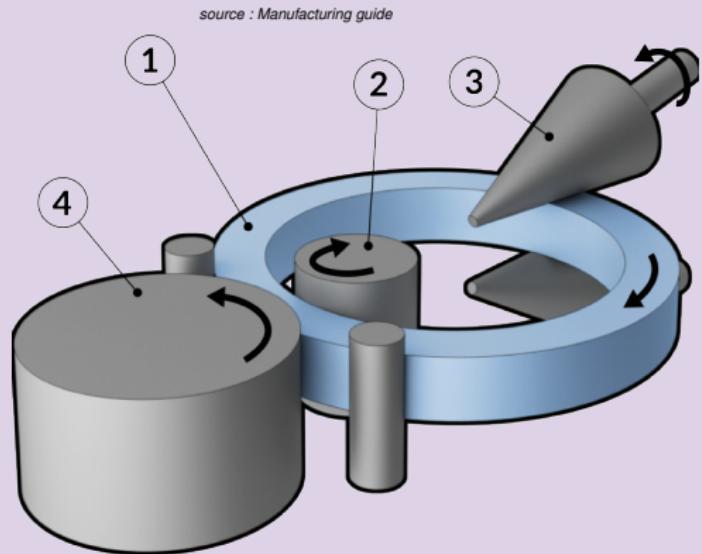


### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



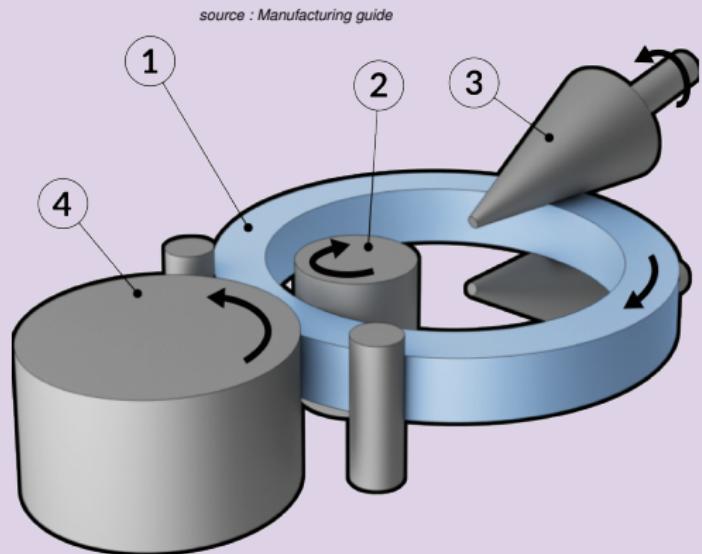
- Dans ce procédé, l'ébauche (1) est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un appui interne (2), un appui externe (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) reculent de sorte à augmenter le diamètre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

### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



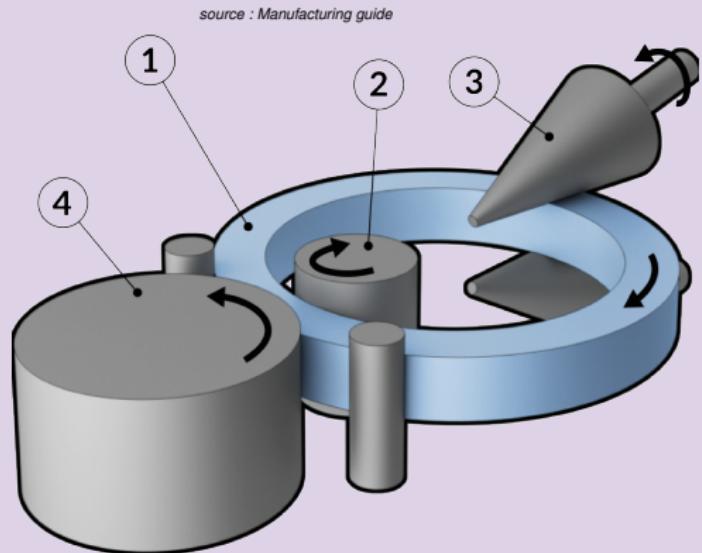
- Dans ce procédé, *l'ébauche (1)* est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un appui interne (2), un appui externe (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) reculent de sorte à augmenter le diamètre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

### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



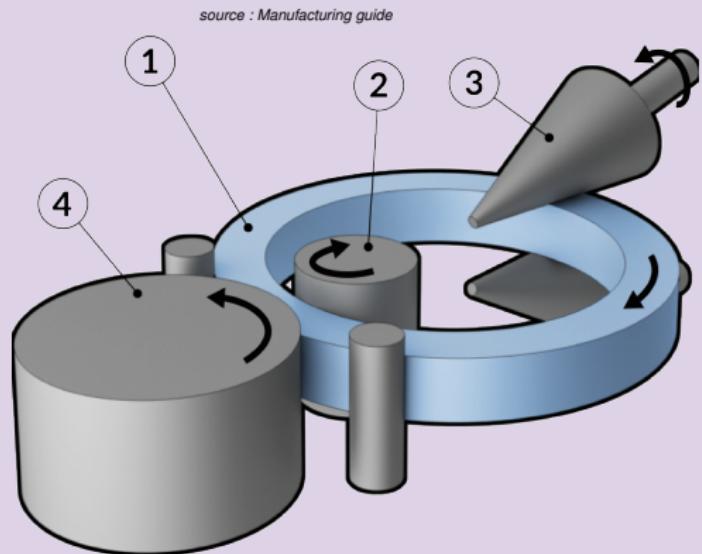
- Dans ce procédé, l'ébauche (1) est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un **appui interne (2)**, un appui externe (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) reculent de sorte à augmenter le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

### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



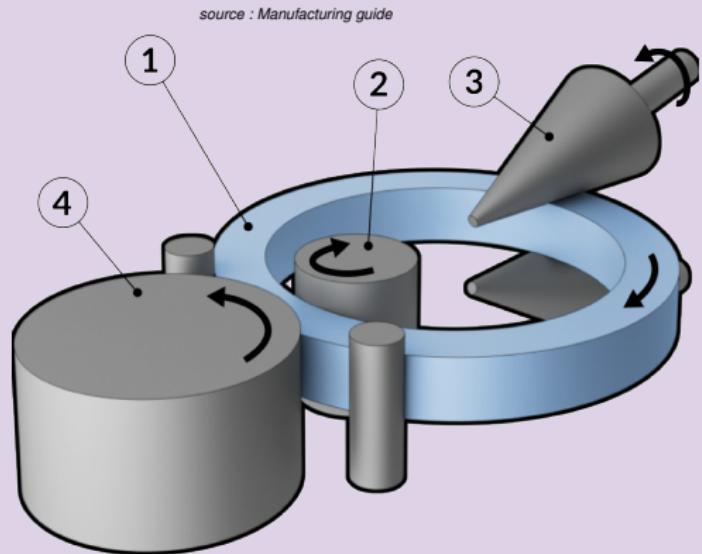
- Dans ce procédé, l'ébauche (1) est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un *appui interne* (2), un *appui externe* (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) reculent de sorte à augmenter le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

### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



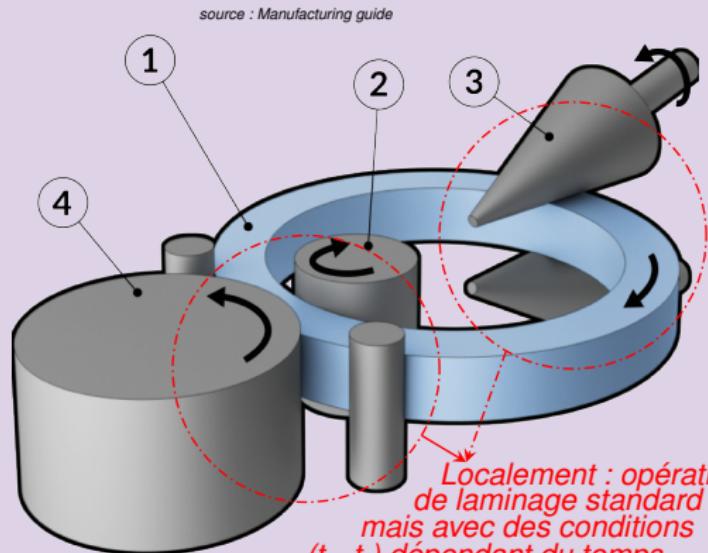
- Dans ce procédé, l'ébauche (1) est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un appui interne (2), un appui externe (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) reculent de sorte à augmenter le diamètre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

### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



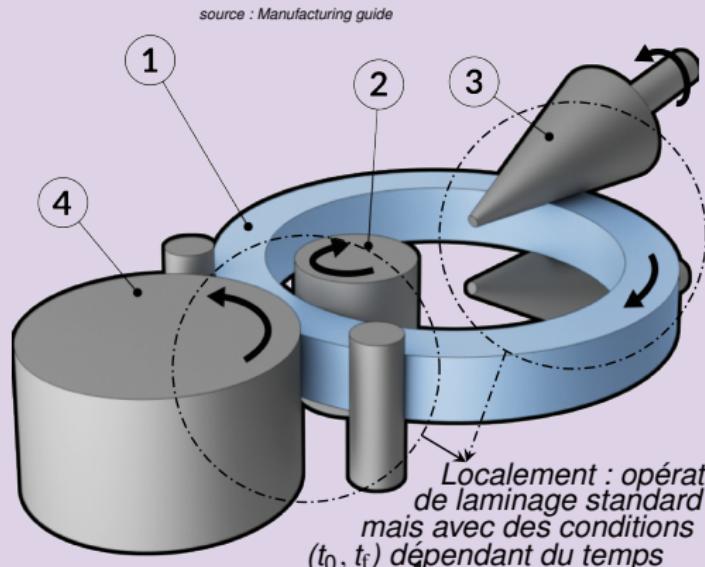
- Dans ce procédé, l'ébauche (1) est une pièce cylindrique percée en son centre.
- Elle est chauffée et tourne en restant en contact contre un appui interne (2), un appui externe (4) et deux rouleaux coniques (3).
- Les rouleaux et les appuis (externe et interne) **reculent** de sorte à augmenter le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

### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



- 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.

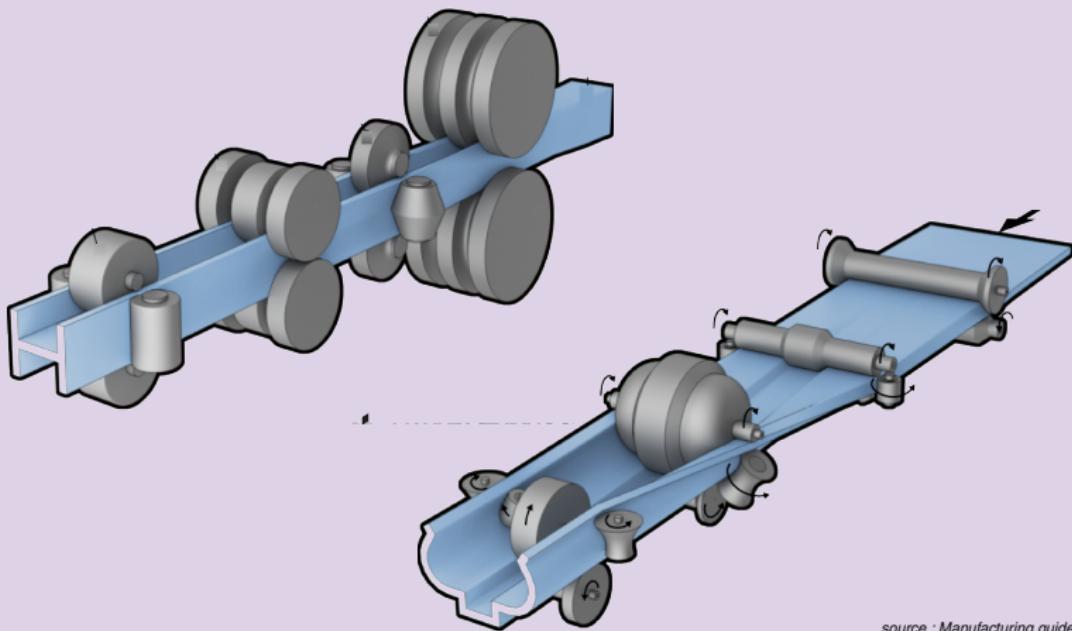
### 3.4.8 Laminage avancés - laminage en tournant



- 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.

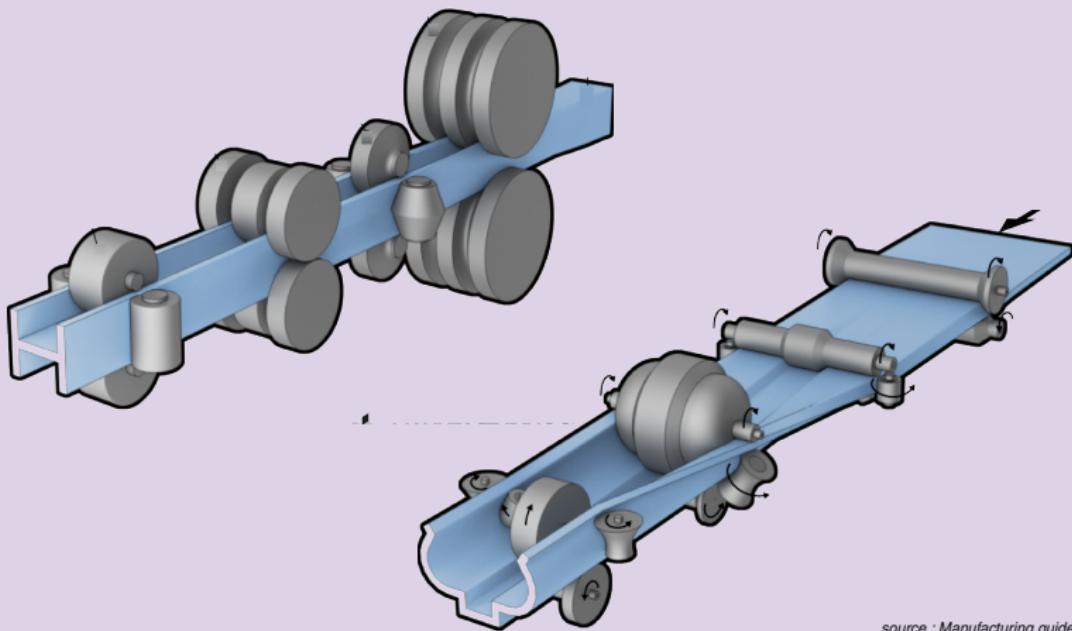
▶ Film : RingRolling.mp4

### 3.4.9 Laminage avancés - laminage de profilés



source : Manufacturing guide

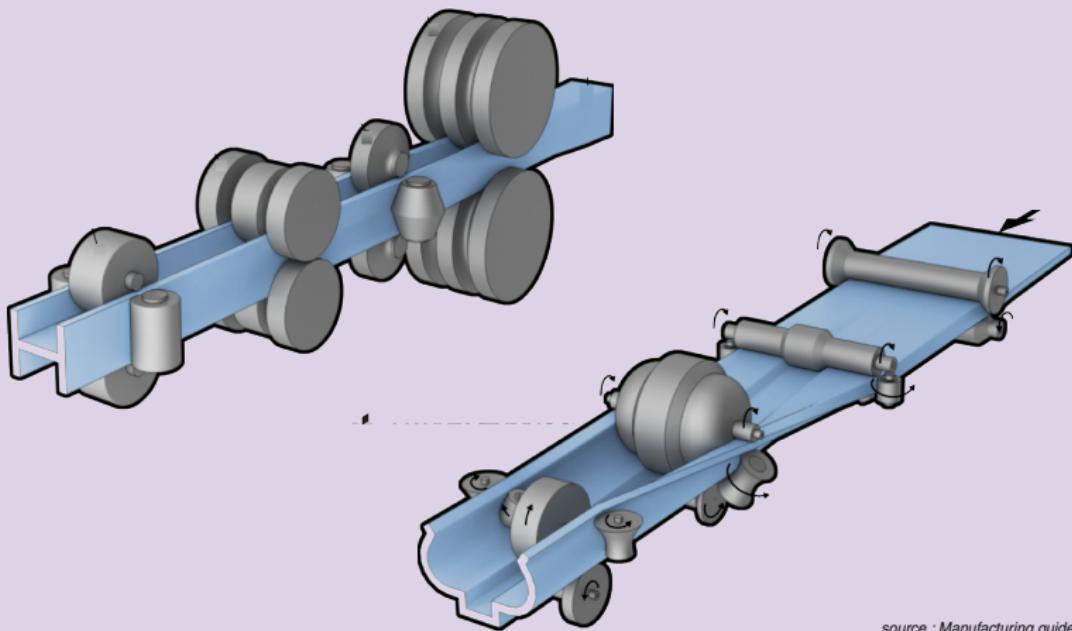
### 3.4.9 Laminage avancés - laminage de profilés



source : Manufacturing guide

▶ Film : SteelmakingRolling.mp4

### 3.4.9 Laminage avancés - laminage de profilés



source : Manufacturing guide

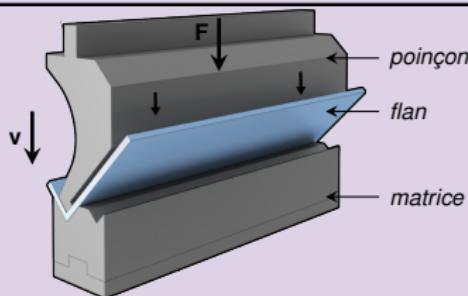
► Exo 2, Série 5

# Deuxième partie

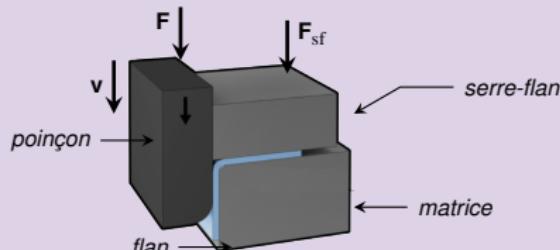
- 5 5. Pliage
- 6 6. Emboutissage
- 7 7. Découpage (poinçonnage)

### 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

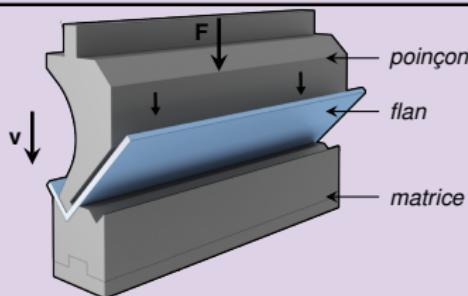


source : Manufacturing guide

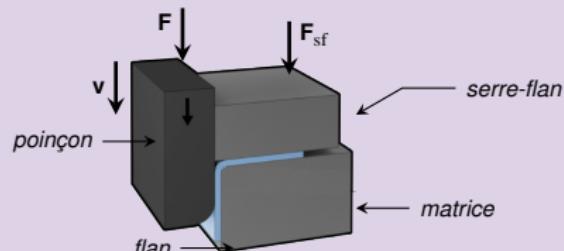
Pliage en coin

### 3.5.1 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**

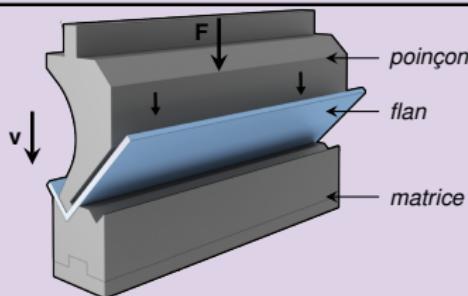


source : Manufacturing guide

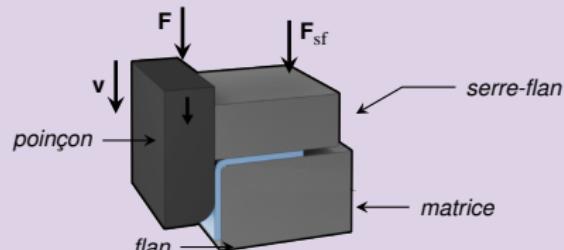
**Pliage en coin**

### 3.5.1 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**

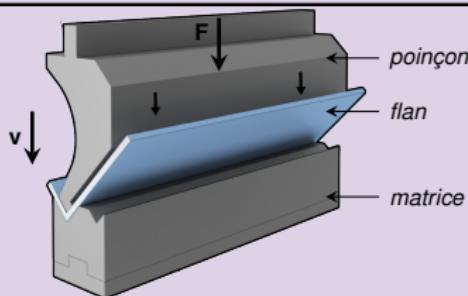


source : Manufacturing guide

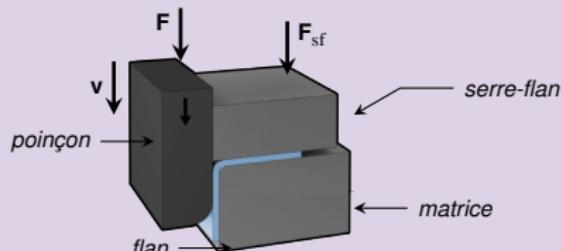
**Pliage en coin**

### 3.5.1 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).



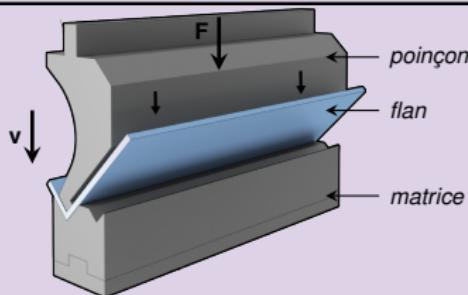
Pliage en V



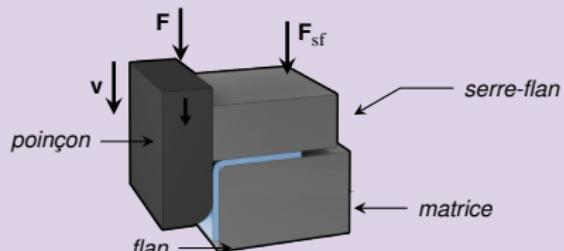
Pliage en coin

### 3.5.1 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*

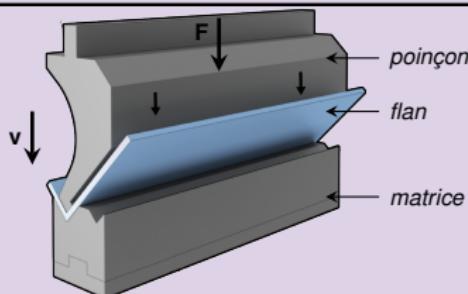


source : Manufacturing guide

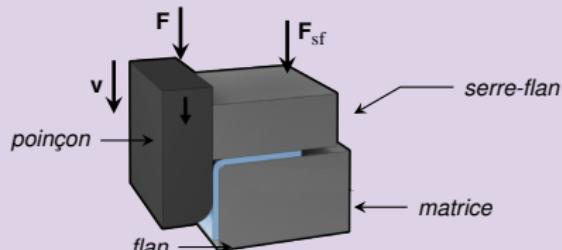
*Pliage en coin*

### 3.5.1 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

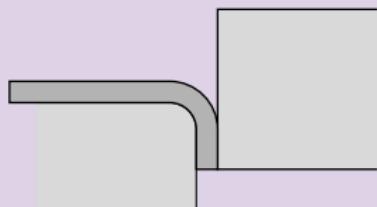
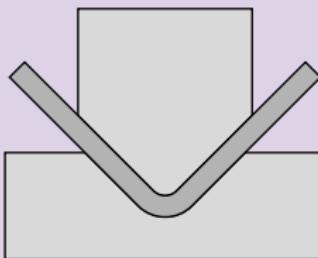
**Pliage en coin**

### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

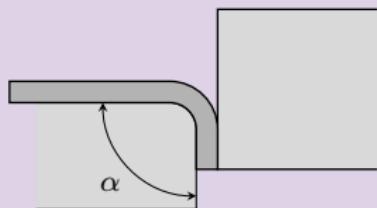
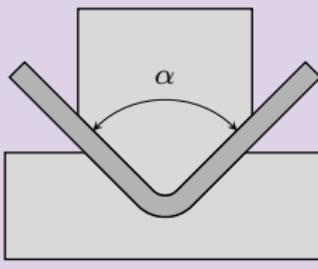


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

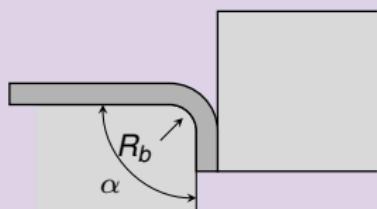
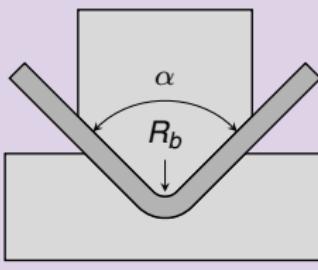


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

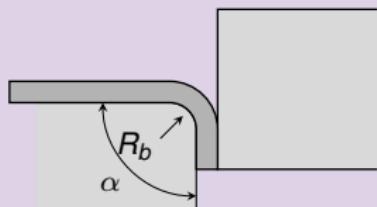
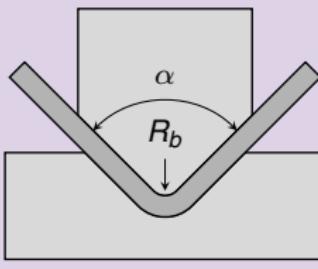


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

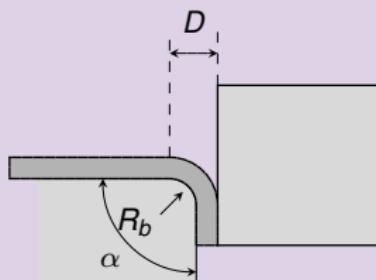
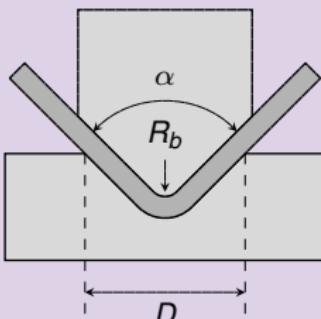


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

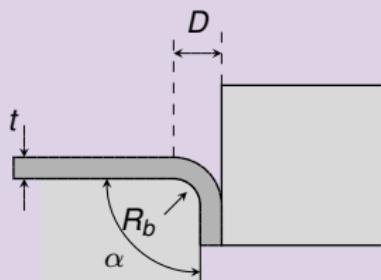
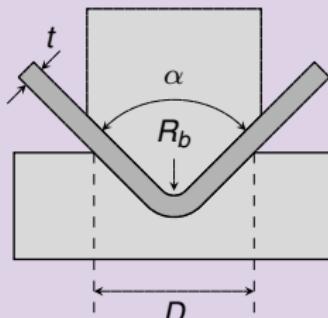


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

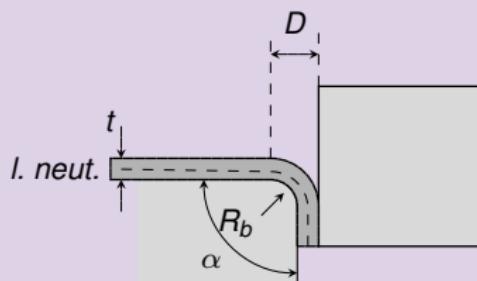
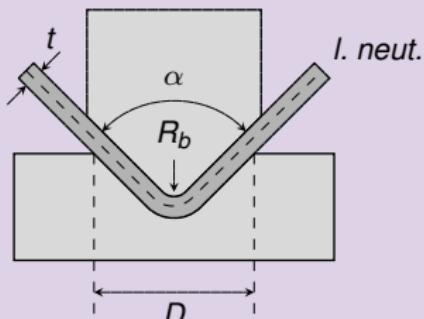


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

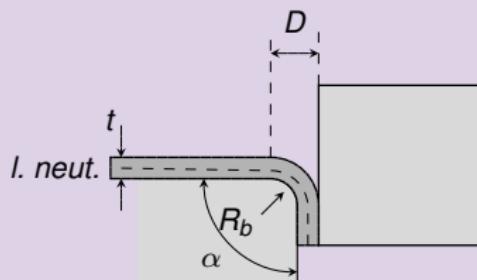
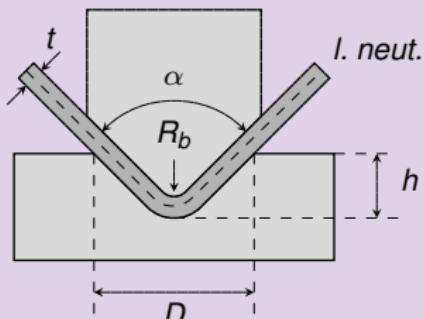


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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

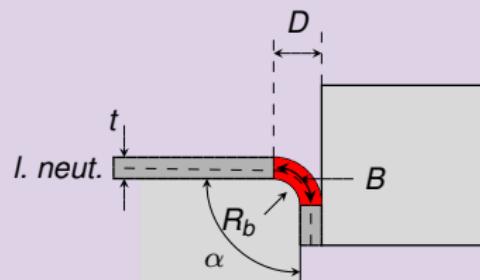
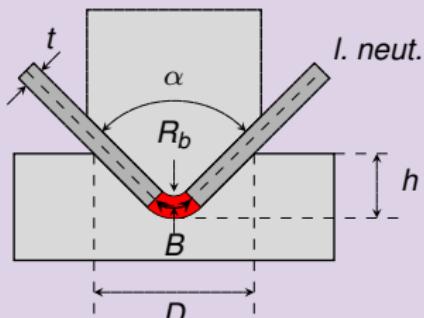


### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

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

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

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



### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

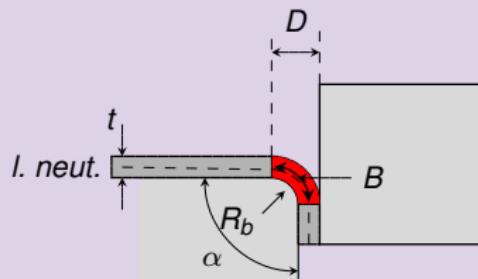
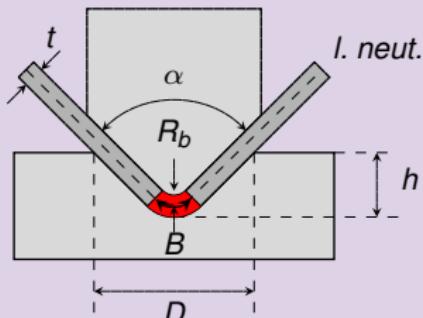
Nom	Unité
$\alpha$ : angle de pliage	rad
$R_b$ : rayon de pliage	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm

• **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)

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

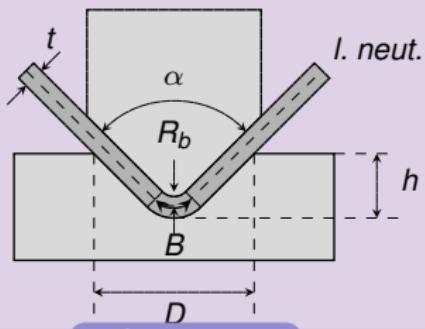
- Pliage en V (angle quelconque) à gauche et pliage en coin (angle de  $90^\circ$ ) à droite



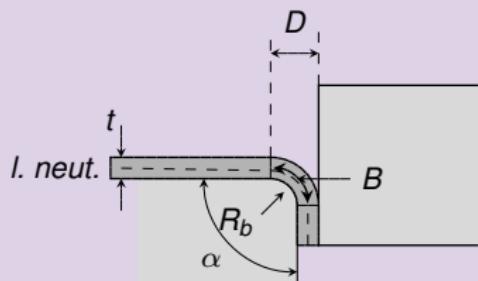
### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

<b>Nom</b>	<b>Unité</b>	<b>Nom</b>	<b>Unité</b>
$\alpha$ : angle de pliage	rad	$D$ : ouverture d'outil	mm
$R_b$ : rayon de pliage	mm	$t$ : épaisseur du flan	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm	$h$ : profondeur de pliage	mm
<b>N.B : <math>B</math> est la longueur du pli (=partie courbée)</b>		$B$ : réserve de pliage	mm
<b>Relations géométriques :</b> $B = (\pi - \alpha) \left( R_b + \frac{1}{2}t \right)$ ; $h = \frac{D}{2} \cot \frac{\alpha}{2}$ (pl. en V)			

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



#### ► Réserve de pliage



## ► Réserve de pliage (fin)

### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

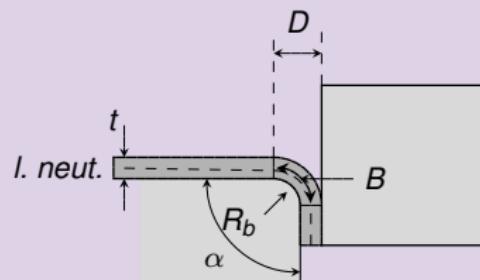
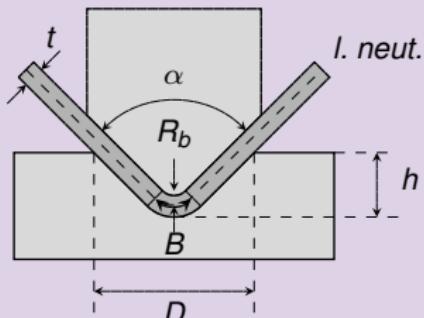
Nom	Unité
$\alpha$ : angle de pliage	rad
$R_b$ : rayon de pliage	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm

• **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)

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

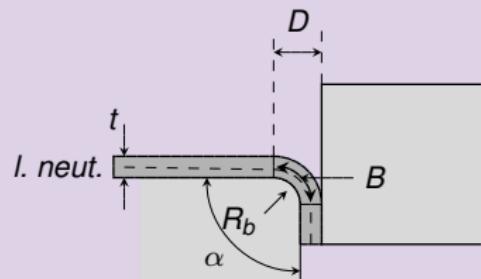
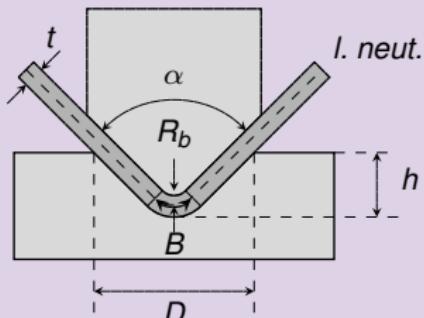
- Pliage en V (angle quelconque) à gauche et pliage en coin (angle de  $90^\circ$ ) à droite



### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

Nom	Unité	Nom	Unité
$\alpha$ : angle de pliage	rad	$D$ : ouverture d'outil	mm
$R_b$ : rayon de pliage	mm	$t$ : épaisseur du flan	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm	$h$ : profondeur de pliage	mm
<b>•N.B :</b> $B$ est la longueur du pli (=partie courbée)		$B$ : réserve de pliage	
<b>•Relations géométriques :</b> $B = (\pi - \alpha) \left( R_b + \frac{1}{2}t \right)$ ; $h = \frac{D}{2} \cot \frac{\alpha}{2}$ (pl. en V)			

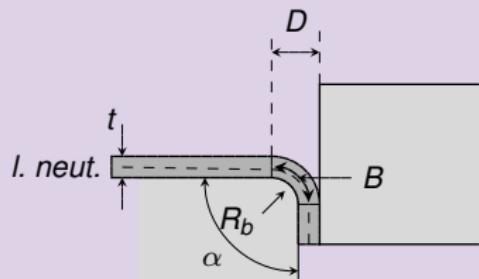
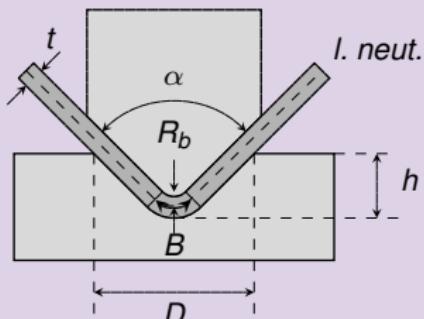
- Pliage en V (angle quelconque) à gauche et pliage en coin (angle de  $90^\circ$ ) à droite



### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

Nom	Unité	Nom	Unité
$\alpha$ : angle de pliage	rad	$D$ : ouverture d'outil	mm
$R_b$ : rayon de pliage	mm	$t$ : épaisseur du flan	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm	$h$ : profondeur de pliage	mm
<b>•N.B :</b> $B$ est la longueur du pli (=partie courbée)		$B$ : réserve de pliage	
<b>•Relations géométriques :</b> $B = (\pi - \alpha) \left( R_b + \frac{1}{2}t \right)$ ; $h = \frac{D}{2} \cot \frac{\alpha}{2}$ (pl. en V)			

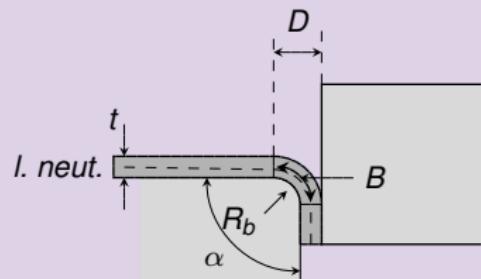
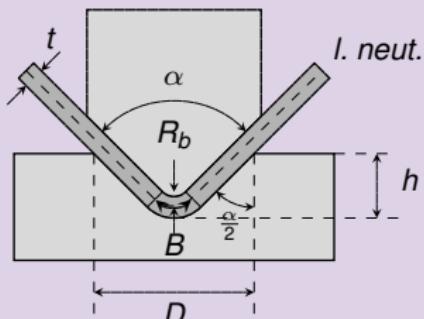
- Pliage en V (angle quelconque) à gauche et pliage en coin (angle de  $90^\circ$ ) à droite



### 3.5.2 Pliage - schéma et nomenclature

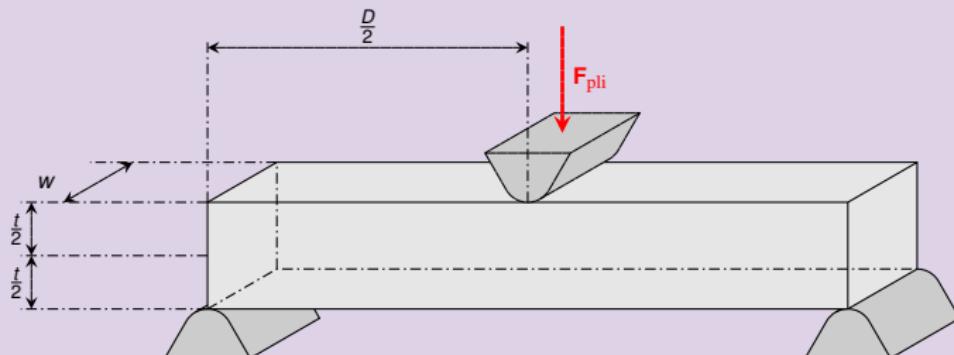
Nom	Unité	Nom	Unité
$\alpha$ : angle de pliage	rad	$D$ : ouverture d'outil	mm
$R_b$ : rayon de pliage	mm	$t$ : épaisseur du flan	mm
$w$ : longueur de l'axe de pliage	mm	$h$ : profondeur de pliage	mm
<b>•N.B :</b> $B$ est la longueur du pli (=partie courbée)		$B$ : réserve de pliage	
<b>•Relations géométriques :</b> $B = (\pi - \alpha) \left( R_b + \frac{1}{2}t \right)$ ; $h = \frac{D}{2} \cot \frac{\alpha}{2}$ (pl. en V)			

- Pliage en V (angle quelconque) à gauche et pliage en coin (angle de  $90^\circ$ ) à droite



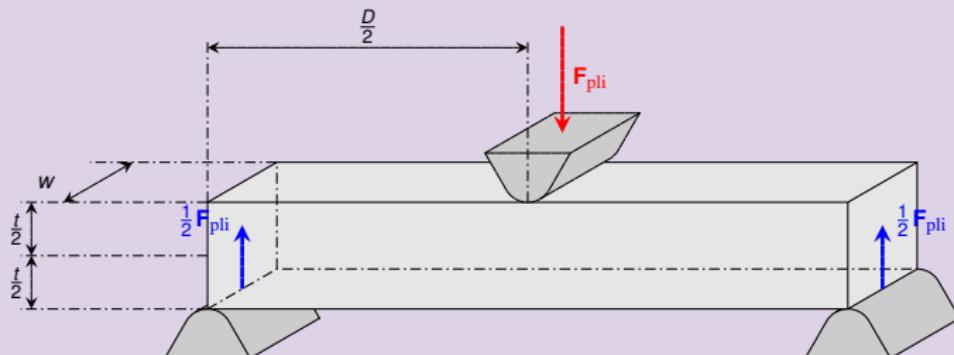
### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La **force de pliage**  $F_{\text{pli}}$  est la force de flexion principale. Les réactions des appuis sont les forces de flexion secondaires.
- 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



### 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  $F_{\text{pli}}$  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.
- 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



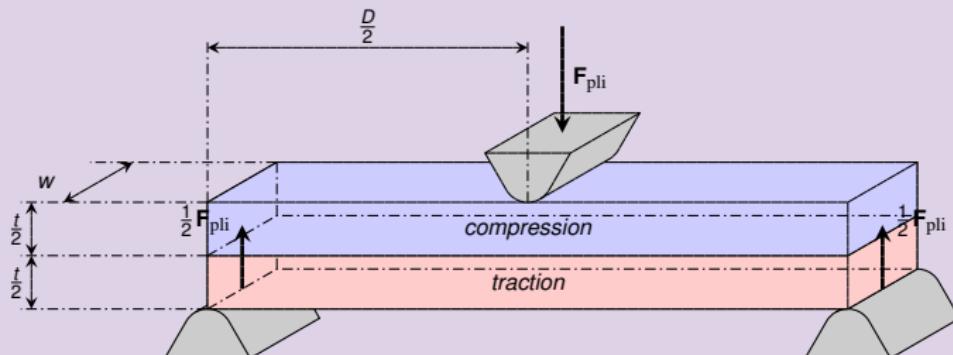
Si le poinçon pousse au centre, les appuis sont symétriques pour assurer l'équilibre mécanique

### 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  $F_{\text{pli}}$  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. compensate celui de la force d'appui :

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

- 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

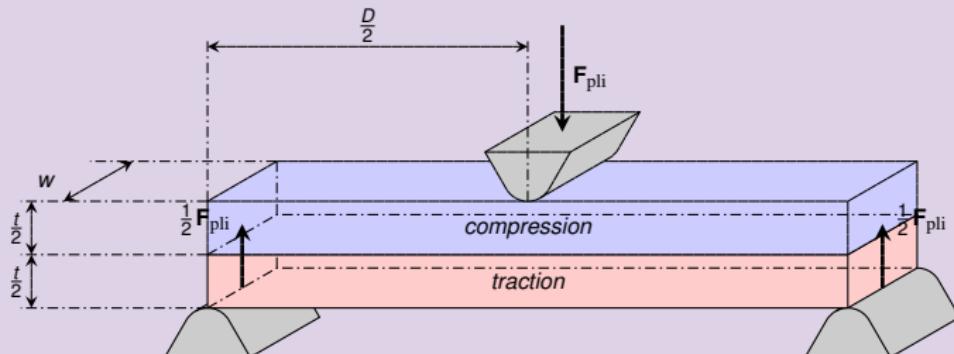


### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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. compensate celui de la force d'appui :

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

- 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



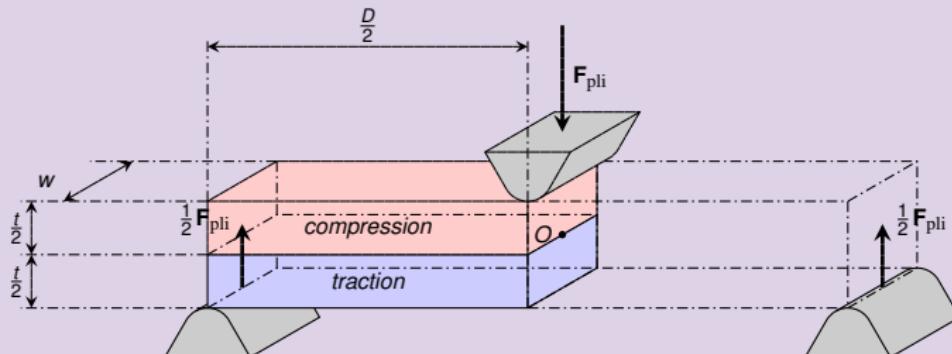
Pour analyser les contraintes dans la section on isole par la pensée une partie de la pièce

### 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  $F_{\text{pli}}$  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. compensate celui de la force d'appui :

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

- 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



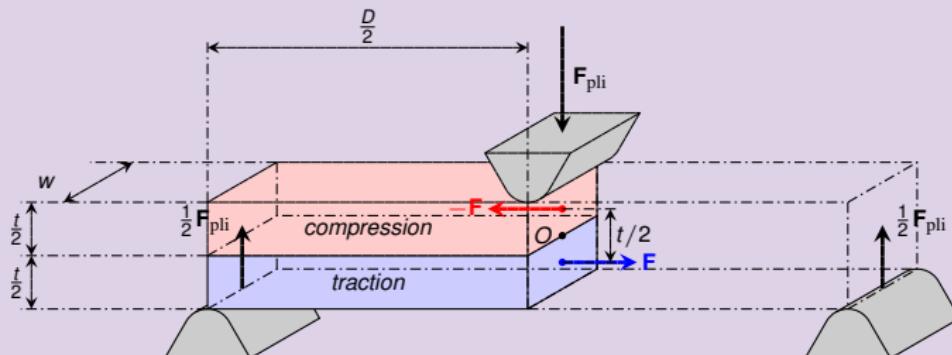
Pour analyser les contraintes dans la section on isole par la pensée une partie de la pièce

### 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  $F_{\text{pli}}$  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. compensate celui de la force d'appui :

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

- 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



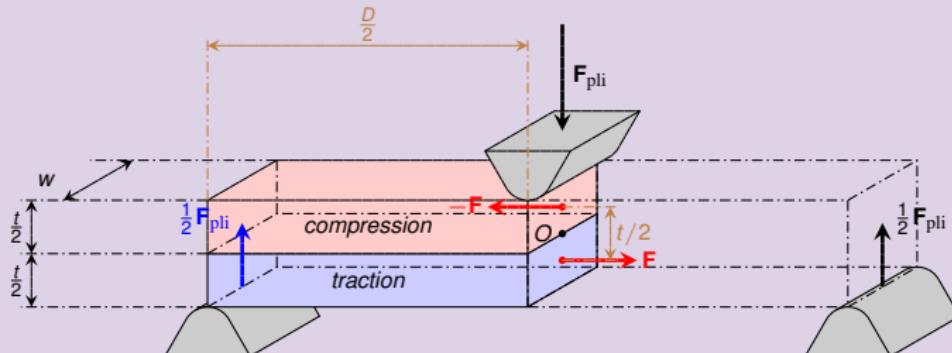
Une force de compression agit en haut, une force de traction exactement opposée agit en bas

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

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

- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_{ew} t^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction

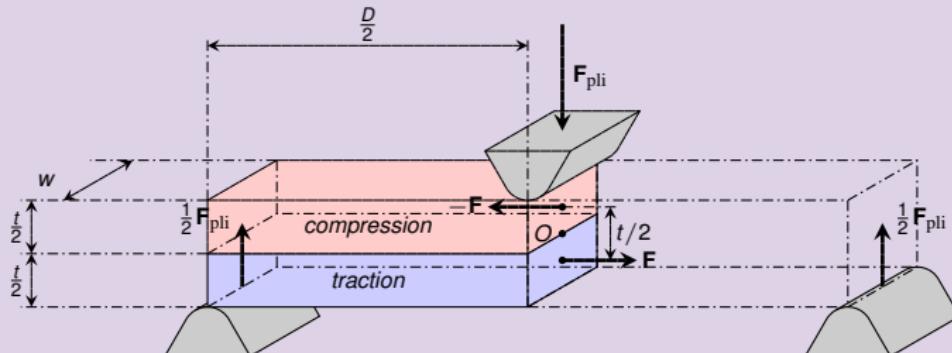


### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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 :

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

- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_{ew} t^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction

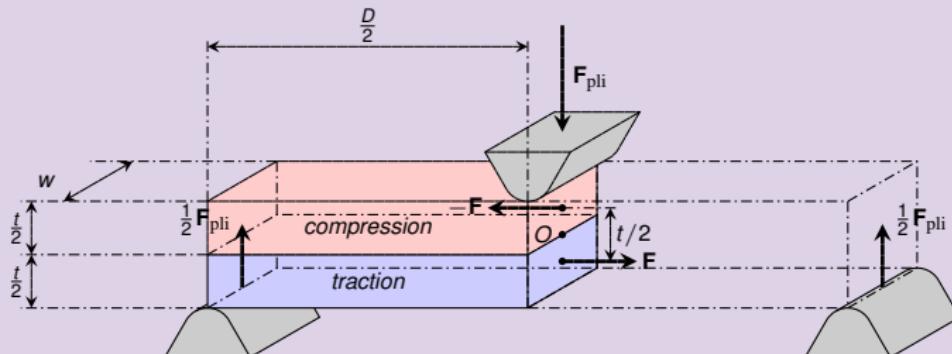


### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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 :

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

- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_{ew} t^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction



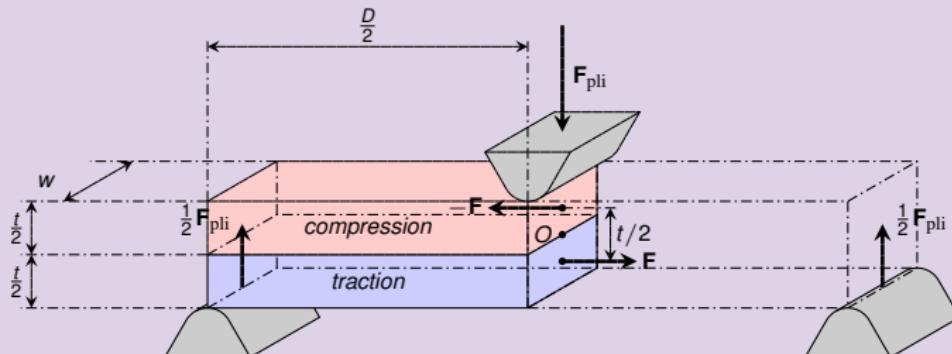
On résoud pour  $F_{\text{pli}}$

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

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

- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_{ew} t^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction



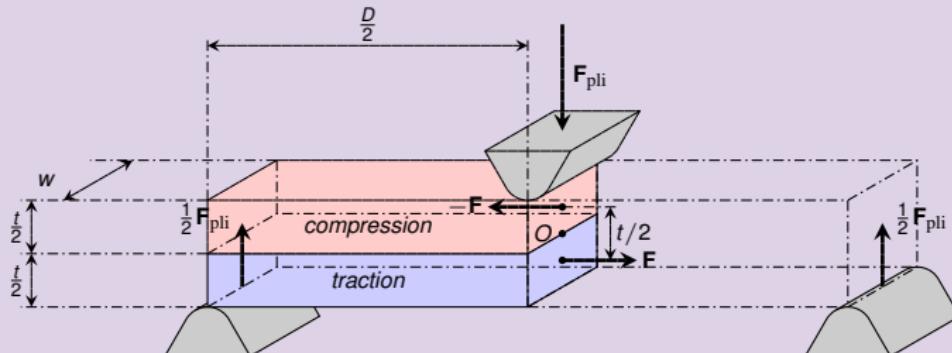
On résoud pour  $F_{\text{pli}}$

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

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

- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_{ew} t^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction

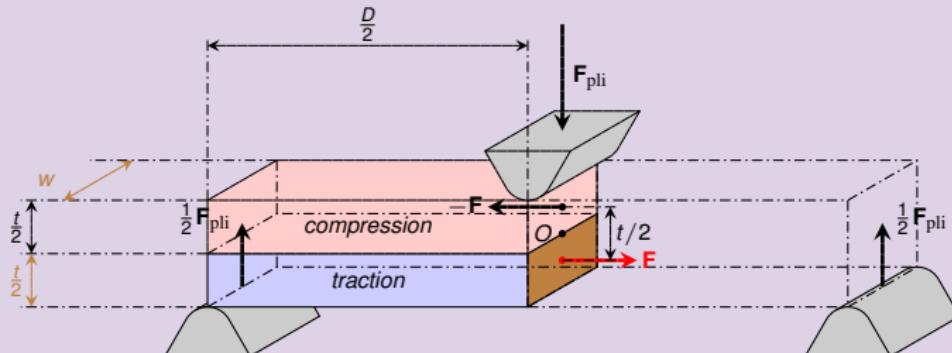


### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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 :

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

- 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



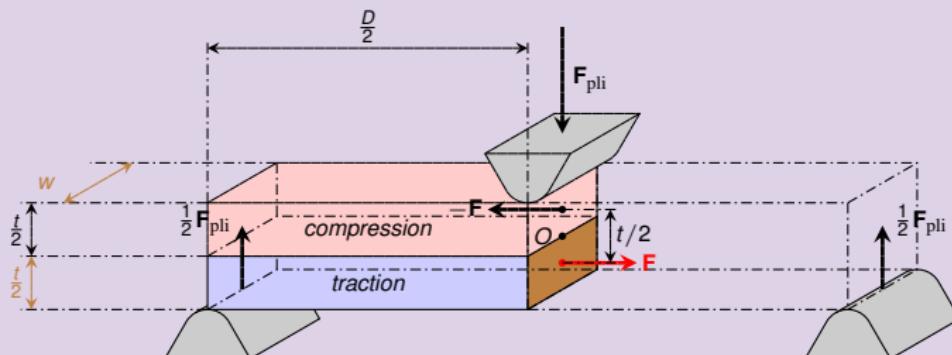
Comme la matière plastifie,  $F$  est engendrée par une contrainte  $\approx R_e$  sur la surface  $wt/2$

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{2R_e \frac{1}{2}wt}{D}$$

- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_e wt^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction



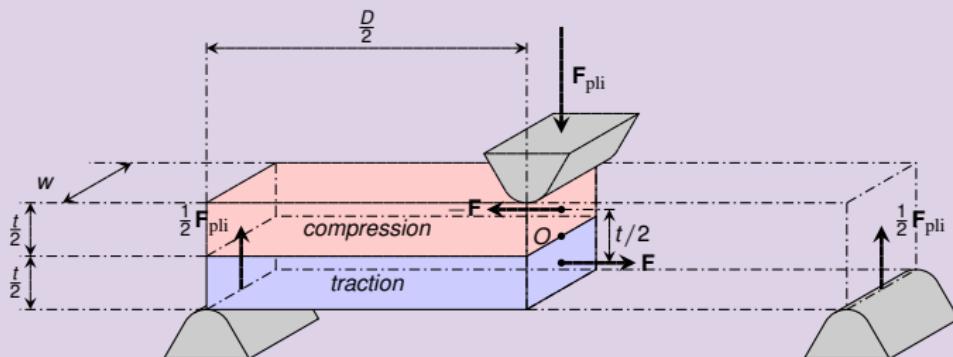
Cela vaut dire que,  $F \approx R_e wt/2$

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{2R_e \frac{1}{2} wtt}{D}$$

- 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

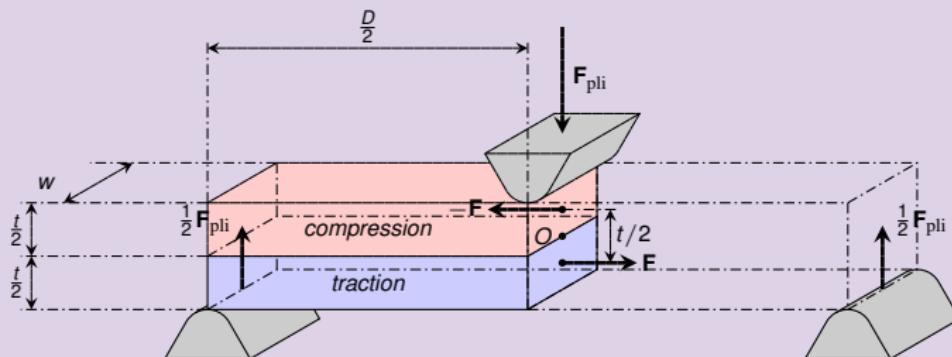


### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{2R_e \frac{1}{2} w t t}{D}$$

- 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



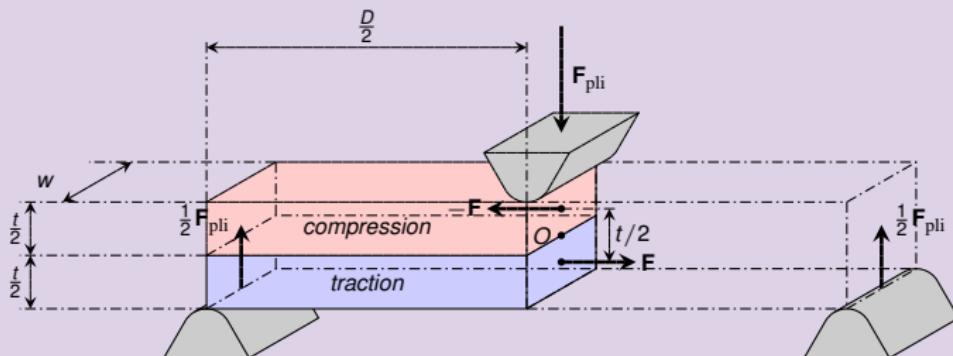
Les facteurs 2 se simplifient et  $tt = t^2$

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{R_e w t^2}{D}$$

- 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



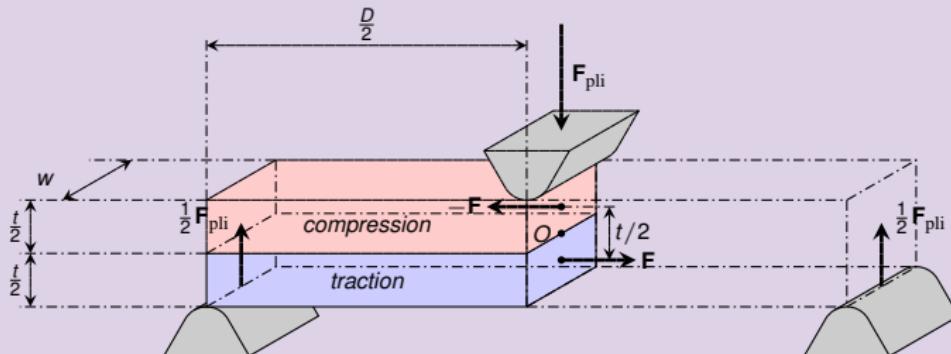
Les facteurs 2 se simplifient et  $tt = t^2$

### 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  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{R_e w t^2}{D}$$

- 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 lorsque la couche de compression n'est pas uniforme.



En conclusion

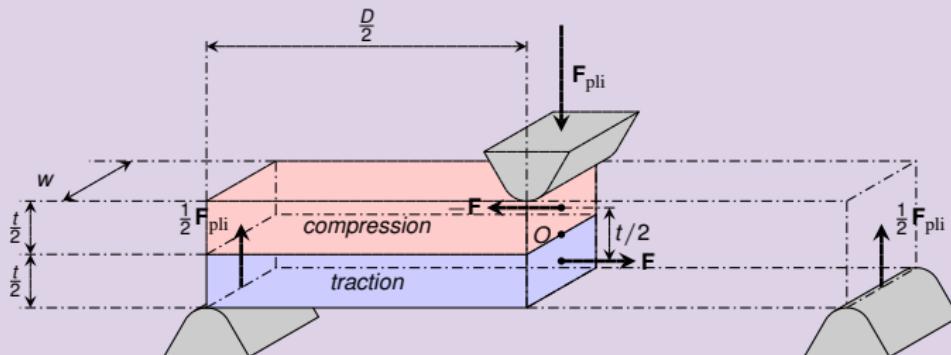
### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{R_e w t^2}{D}$$

- 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  $h$  :

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



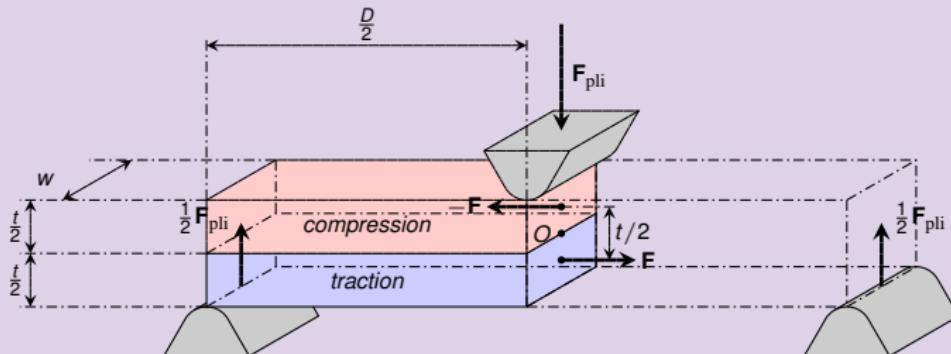
### 3.5.3 Force et travail de pliage (cas du pliage en V)

- La pièce pliée est sollicitée en flexion trois points. La force de pliage  $F_{\text{pli}}$  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 :

$$F \frac{t}{2} = \frac{1}{2} F_{\text{pli}} \frac{D}{2} \implies F_{\text{pli}} = \frac{2Ft}{D} \approx \frac{R_e w t^2}{D}$$

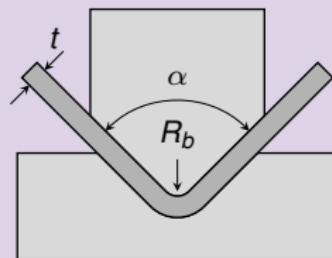
- Dans le cas général,  $F_{\text{pli}} \approx K_b \frac{R_e w t^2}{D}$  où  $K_b$  est un facteur de correction. Notons que le travail de pliage fait intervenir la course du poinçon  $\simeq$  prof. de pliage  $h$  :

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

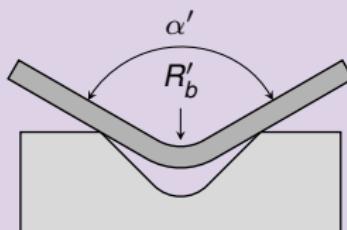


### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

- Lors du retrait du poinçon, l'angle de pliage a tendance à s'ouvrir :  $\alpha \rightarrow \alpha' > \alpha$  :
  - 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



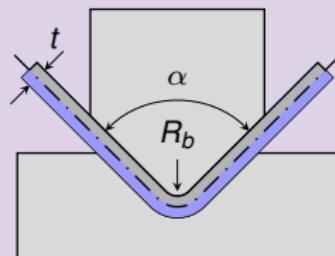
Avant relaxation



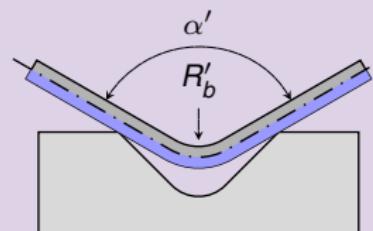
Après relaxation

### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

- 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



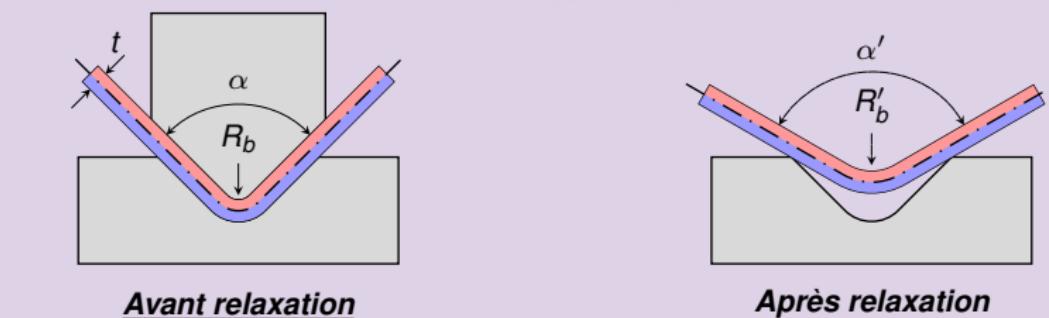
Avant relaxation



Après relaxation

### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

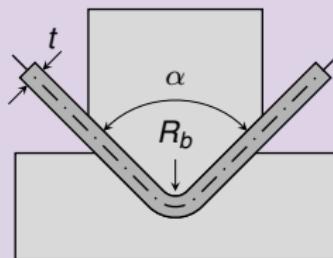
- Lors du retrait du poinçon, l'angle de pliage a tendance à s'ouvrir :  $\alpha \rightarrow \alpha' > \alpha$  :
  - Les **fibres allongées** ont tendance à se retirer (retrait élastique),
  - Les **fibres comprimées** ont tendance à s'allonger (expansion élastique).
- Dans le cas d'un pliage en V et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



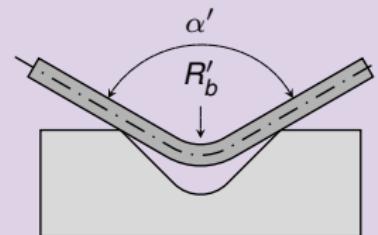
### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

- 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 **plaquette 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



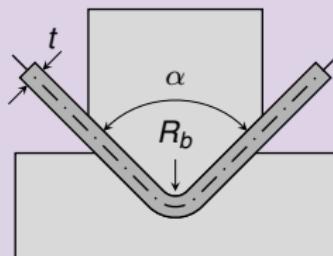
Après relaxation

### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

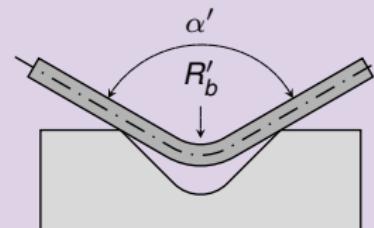
- Lors du retrait du poinçon, l'angle de pliage a tendance à s'ouvrir :  $\alpha \rightarrow \alpha' > \alpha$  :
  - Les fibres allongées ont tendance à se retirer (retrait élastique),
  - Les fibres comprimées ont tendance à s'allonger (expansion élastique).
- Dans le cas d'un pliage en V et sous les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

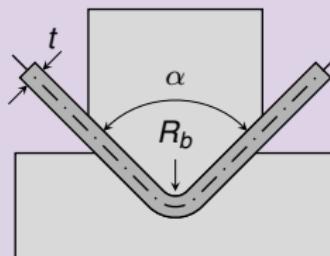


Après relaxation

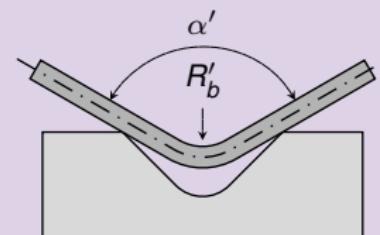
### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

- 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 **plaqué 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

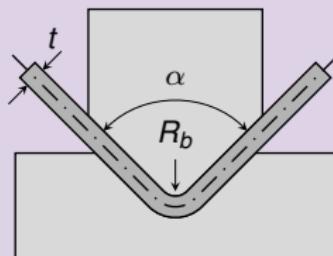


Après relaxation

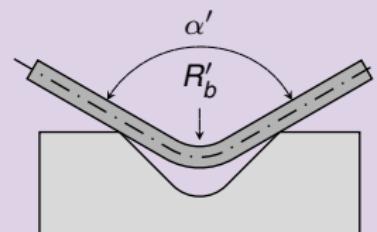
### 3.5.4 Pliage en V - rebond élastique

- 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 **plaqué 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

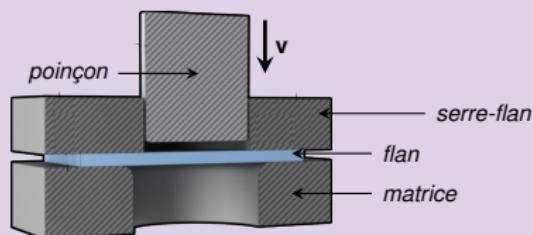


Après relaxation

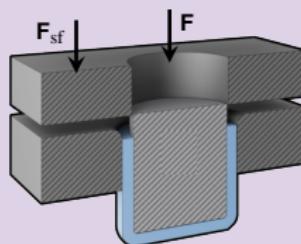
Pas de pli donc pas de rebond si  $\alpha = 180^\circ$

### 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**

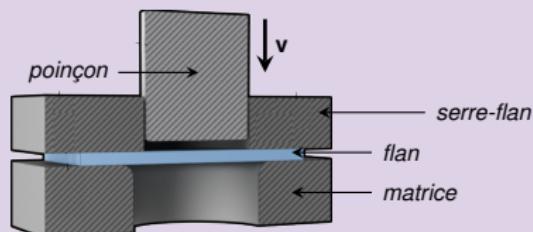


**Fin de l'opération**

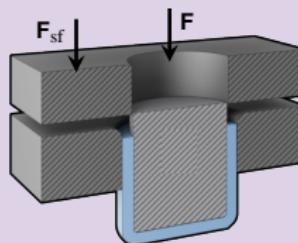
source : Manufacturing guide

### 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

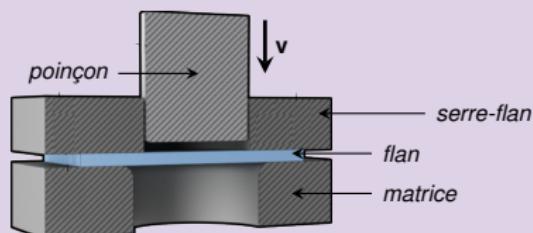


Fin de l'opération

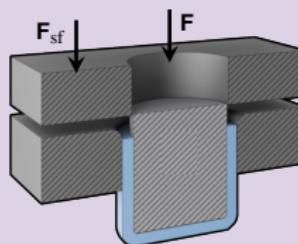
source : Manufacturing guide

### 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

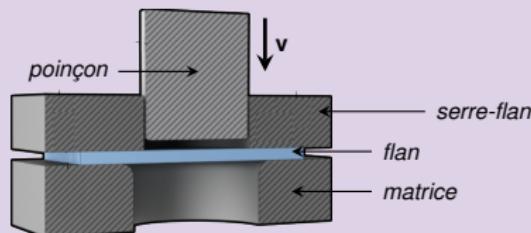


Fin de l'opération

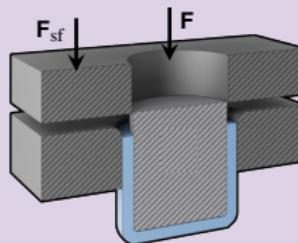
source : Manufacturing guide

### 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

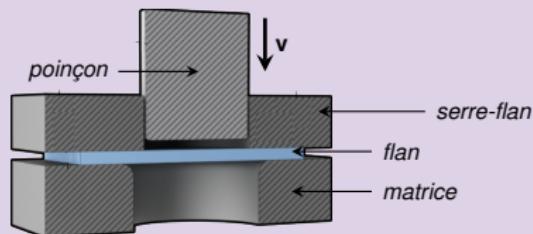


Fin de l'opération

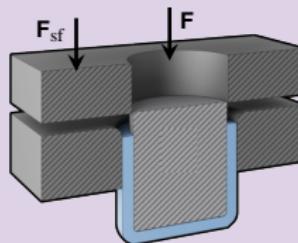
source : Manufacturing guide

### 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 **matériaux 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**

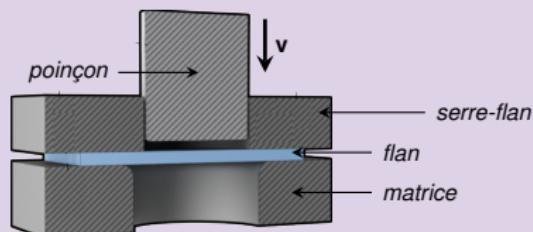


**Fin de l'opération**

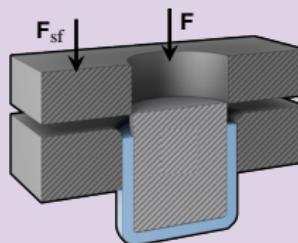
source : Manufacturing guide

### 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 **matériaux 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

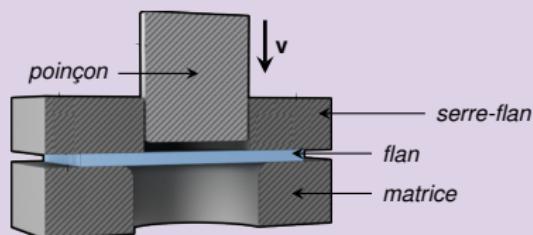


Fin de l'opération

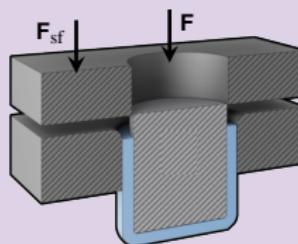
source : Manufacturing guide

### 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

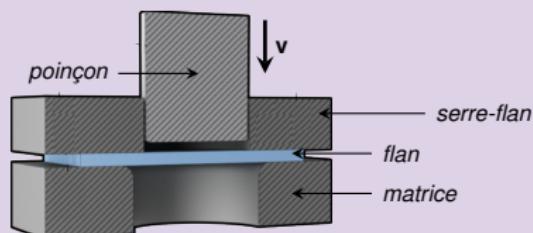


Fin de l'opération

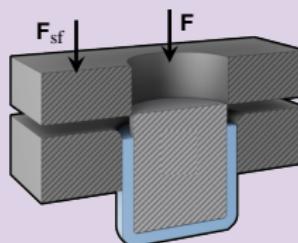
source : Manufacturing guide

### 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**



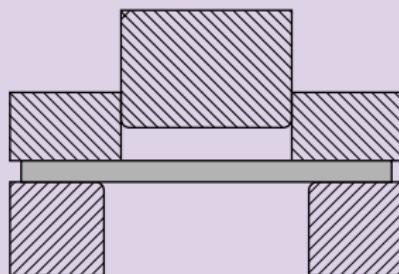
**Fin de l'opération**

▶ Film : Emboutissage

### 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

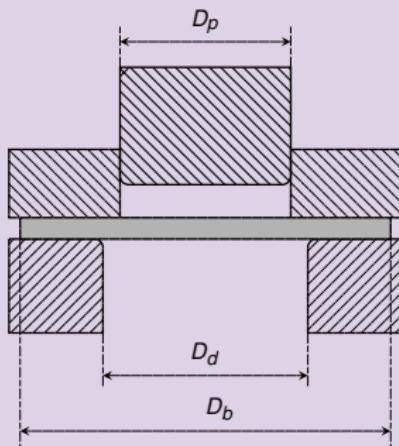


• *Relations géométriques*

### 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

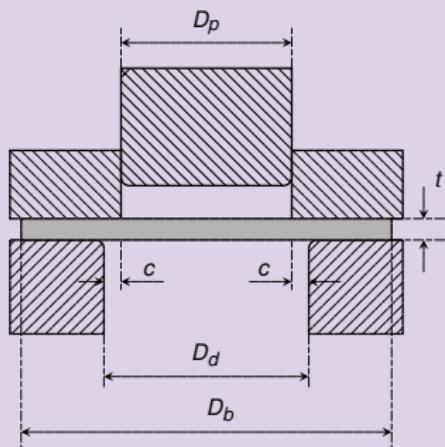


• Relations géométriques

### 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



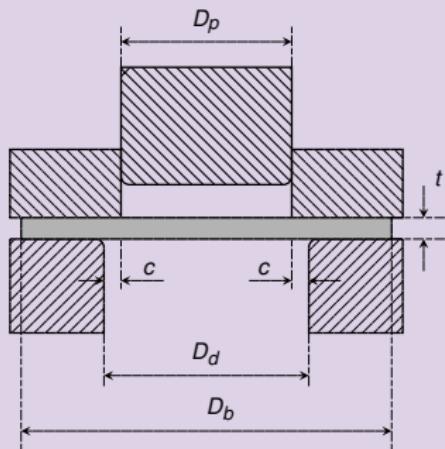
- *Relations géométriques*

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

### 3.6.2 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

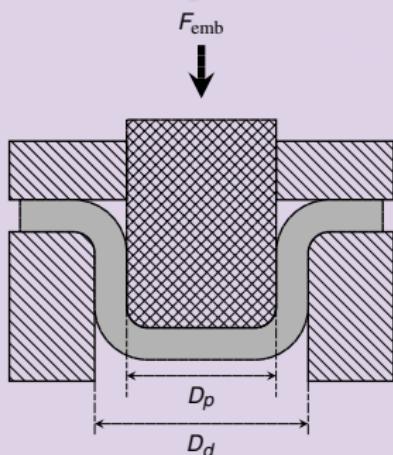


- **Relations géométriques**

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

### 3.6.3 Emboutissage - force et travail

- La force d'emboutissage  $F_{\text{emb}}$  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 :
- Le travail d'emboutissage  $W_{\text{emb}}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :

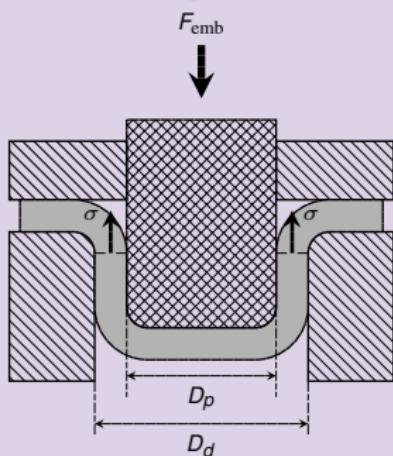


### 3.6.3 Emboutissage - force et travail

- La force d'emboutissage  $F_{\text{emb}}$  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  $W_{\text{emb}}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :

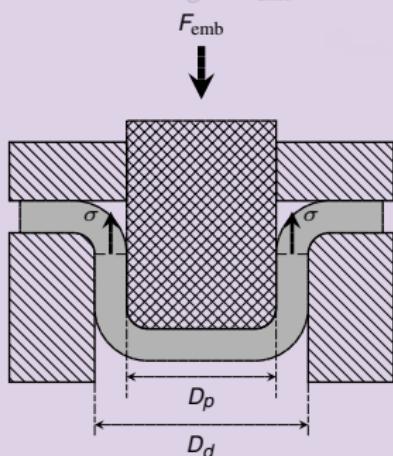


### 3.6.3 Emboutissage - force et travail

- La force d'emboutissage  $F_{\text{emb}}$  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  $W_{\text{emb}}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :



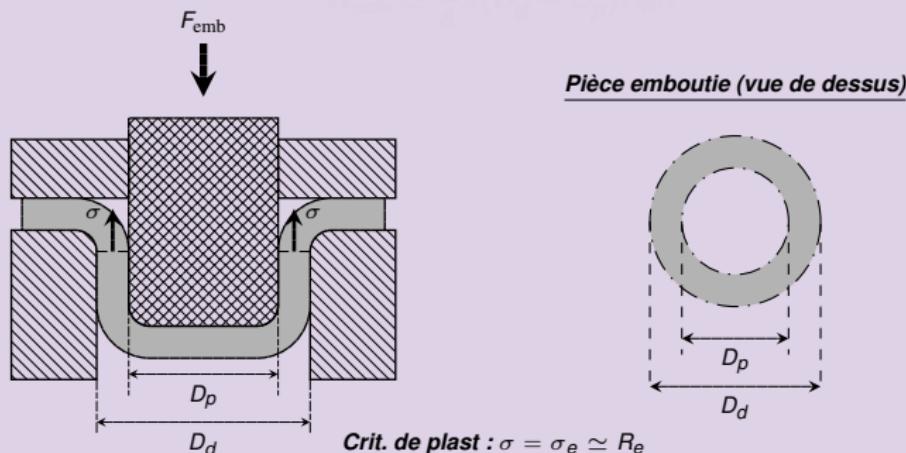
▶ Calcul de la force d'emboutissage (Tableaux 9)

### 3.6.3 Emboutissage - force et travail

- La force d'emboutissage  $F_{\text{emb}}$  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  $W_{\text{emb}}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :



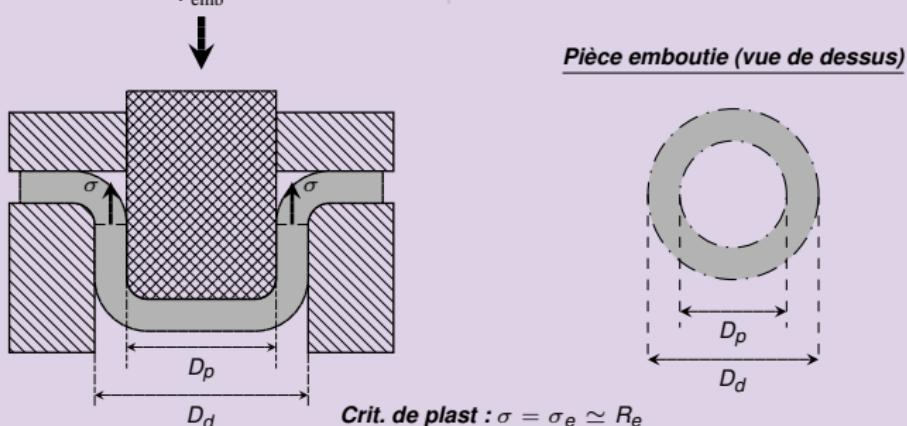
### 3.6.3 Emboutissage - force et travail

- La force d'emboutissage  $F_{\text{emb}}$  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  $W_{\text{emb}}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :

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



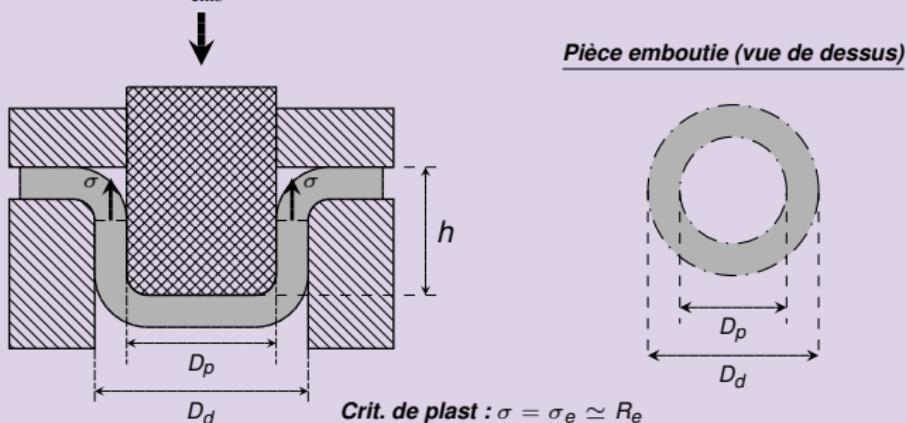
### 3.6.3 Emboutissage - force et travail

- La force d'emboutissage  $F_{\text{emb}}$  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  $W_{\text{emb}}$  fait intervenir la course  $h$  du poinçon :

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

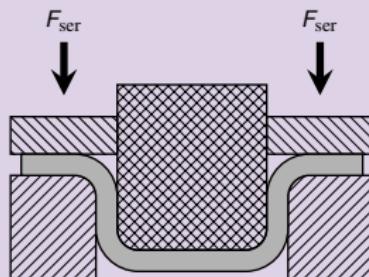


### 3.6.4 Emboutissage - force de serrage

- 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  $\eta = 30\%$ .

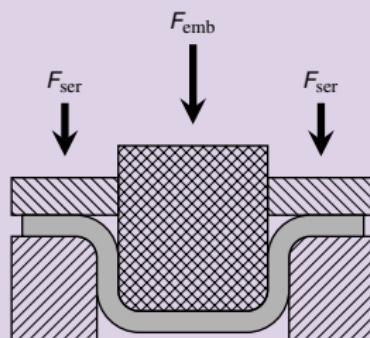


### 3.6.4 Emboutissage - force de serrage

- 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  $\eta = 30\%$ .



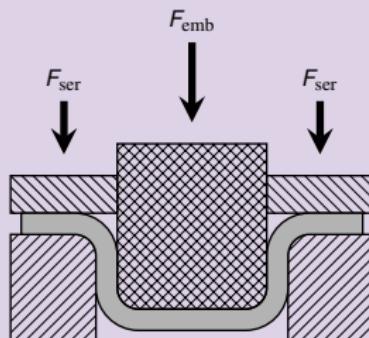
### 3.6.4 Emboutissage - force de serrage

- 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**.

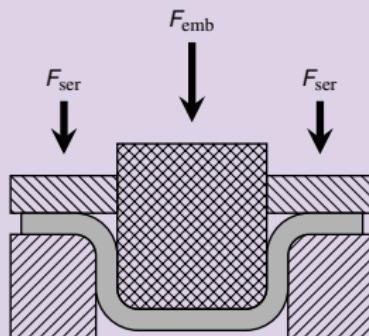


### 3.6.4 Emboutissage - force de serrage

- 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



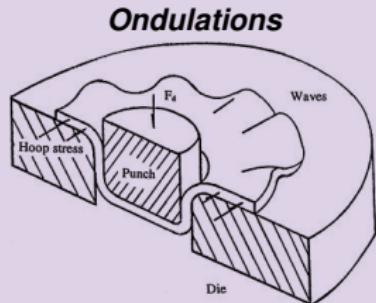
## 3.6.5 Emboutissage

### Exemple de pièces



▶ Film : Emboutissage.mp4

## 3.6.6 Emboutissage - défauts en emboutissage



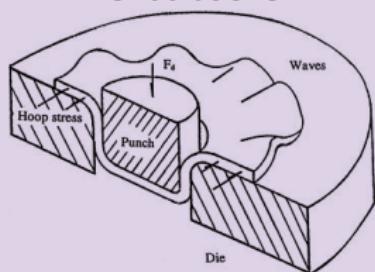
*Effets d'oreille*

*Fissures*

*Rayures*

### 3.6.6 Emboutissage - défauts en emboutissage

## *Ondulations*

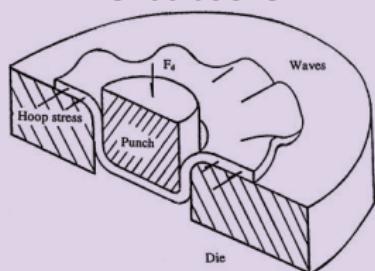


### ***Effets d'oreille***



### 3.6.6 Emboutissage - défauts en emboutissage

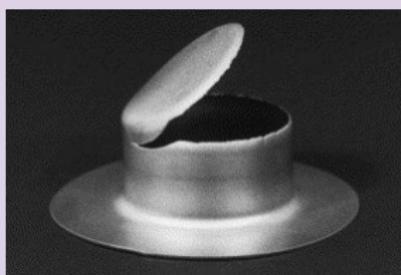
*Ondulations*



*Effets d'oreille*



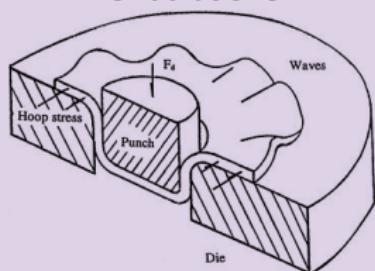
*Fissures*



*Rayures*

### 3.6.6 Emboutissage - défauts en emboutissage

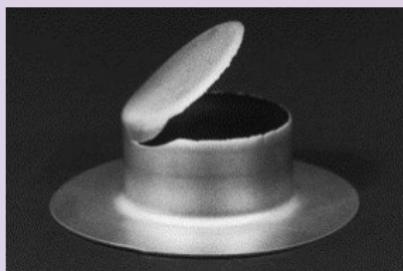
*Ondulations*



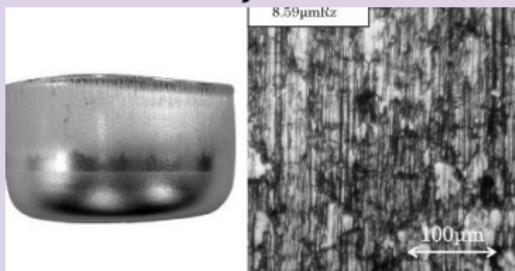
*Effets d'oreille*



*Fissures*

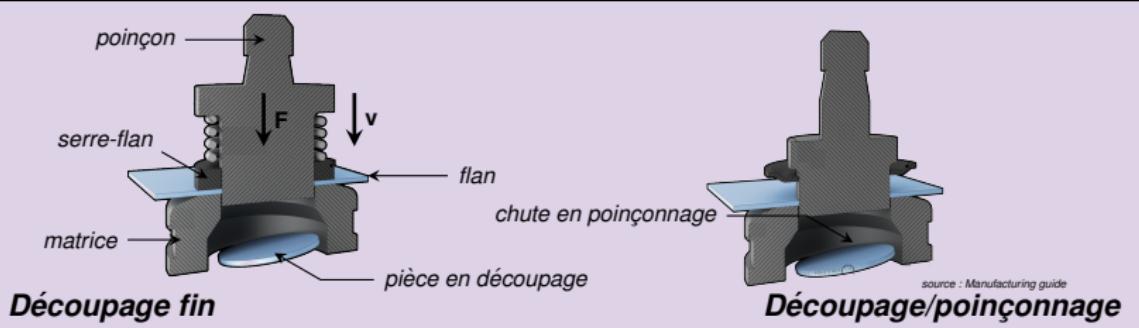


*Rayures*



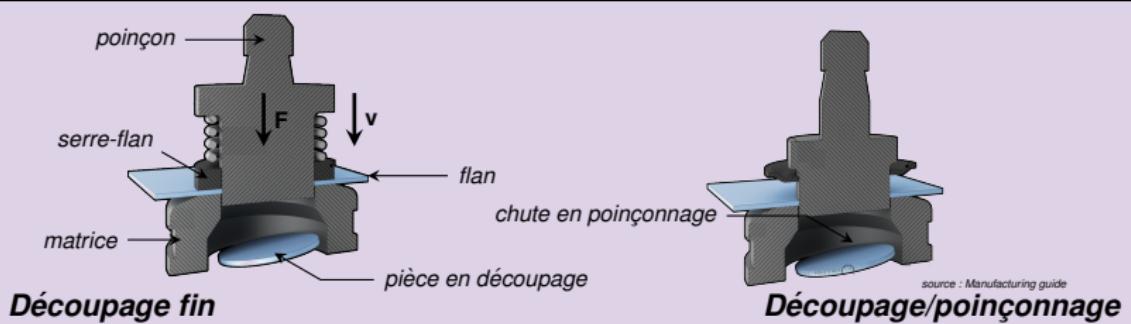
### 3.7.1 Découpage-poinçonnage - principe

- 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.



### 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.



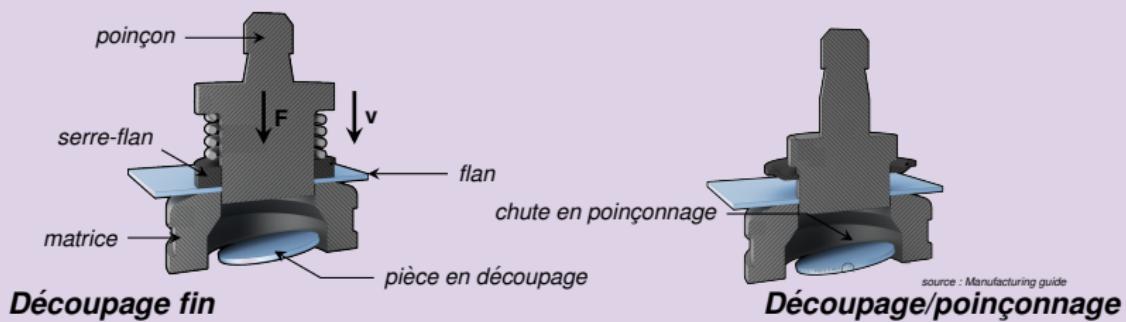
### 3.7.1 Découpage-poinçonnage - principe

- 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.



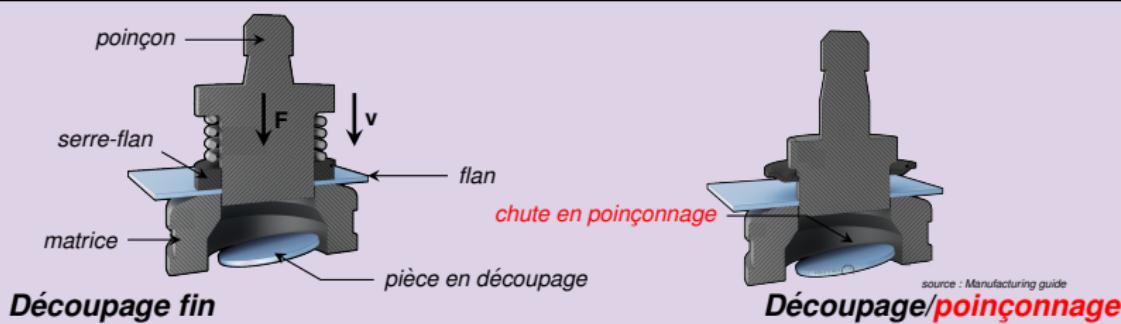
### 3.7.1 Découpage-poinçonnage - principe

- 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.



### 3.7.1 Découpage-poinçonnage - principe

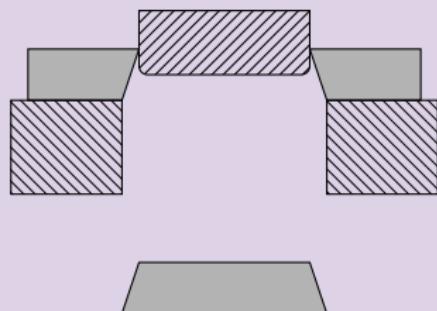
- En découpage, on engendre des contraintes de cisaillement allant au-delà de la résistance du matériau pour provoquer sa rupture.
- Pour favoriser l'apparition nette de contraintes de cisaillement, il est important que les arêtes du poinçon et de la matrice soient affutées.
- Avant de provoquer sa rupture, 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.



### 3.7.2 Découpage - 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

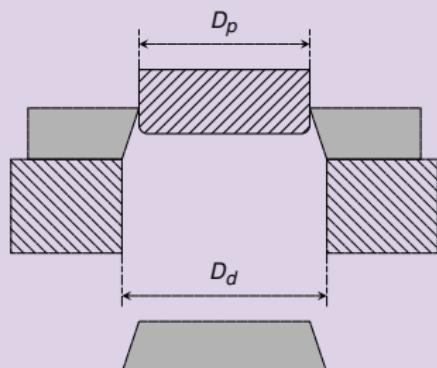


• *Relations géométriques*

### 3.7.2 Découpage - 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

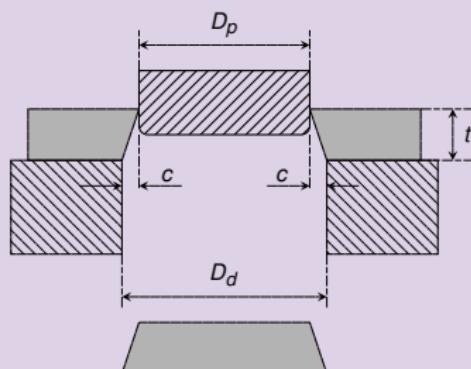


- Relations géométriques

### 3.7.2 Découpage - 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



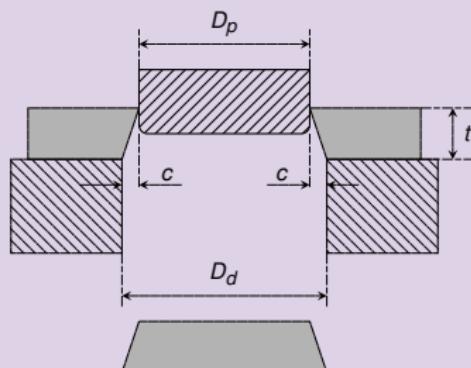
- *Relations géométriques*

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

### 3.7.2 Découpage - 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

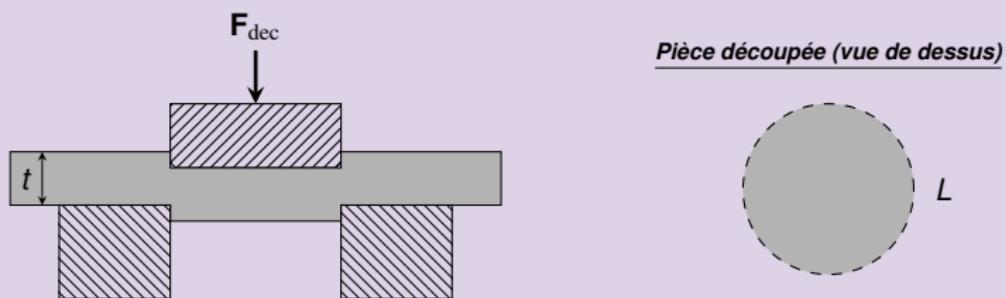


- **Relations géométriques**

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

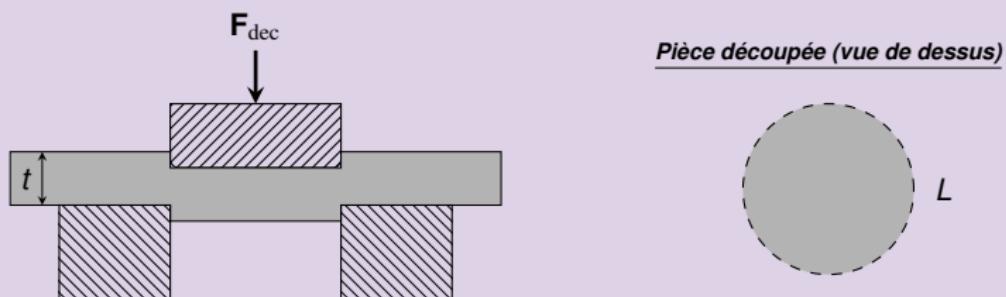
### 3.7.3 Découpage - force et travail

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



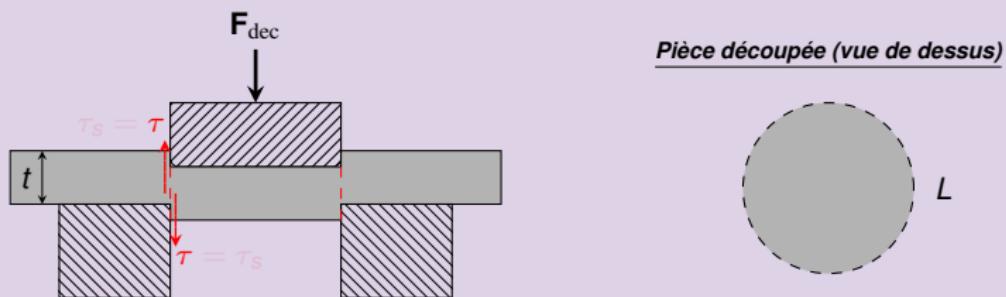
### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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  $\tau_s$  du matériau, il faut que
- On calcule le travail de déc.  $W_{dec}$  en intégrant la force  $F_{dec}$  contre son dépl. :



### 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  $\tau_s$  du matériau, il faut que
- On calcule le travail de déc.  $W_{dec}$  en intégrant la force  $F_{dec}$  contre son dépl. :

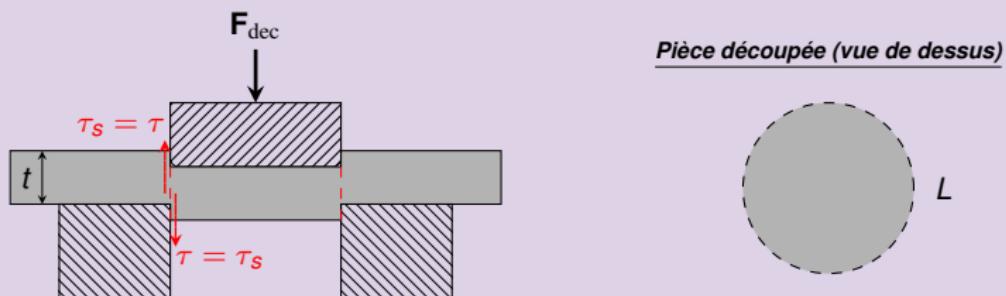


### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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. :

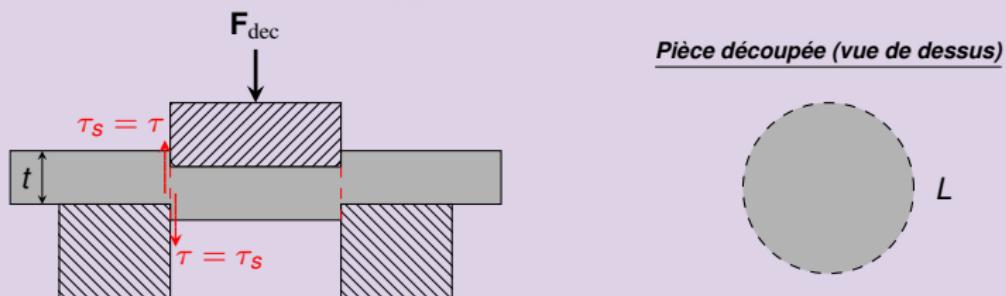


### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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. :



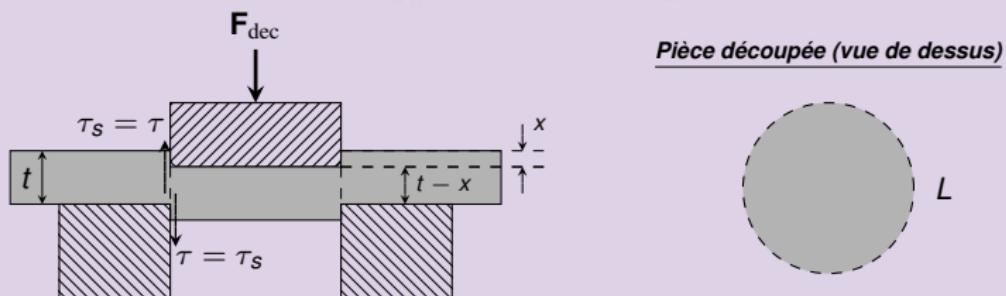
▶ Calcul de la force de découpage (Tableaux 10)

### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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. :



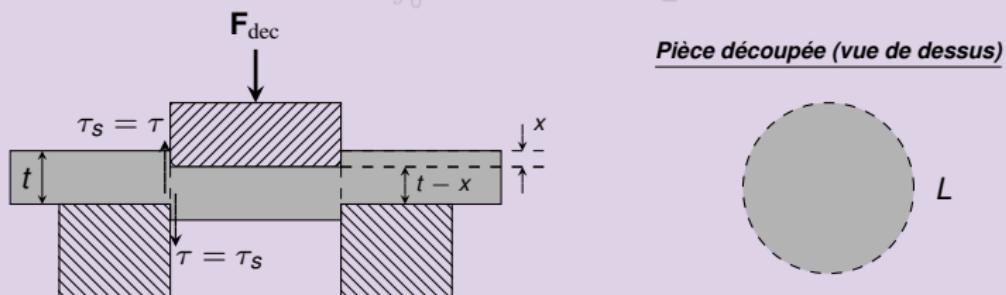
### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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. :

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



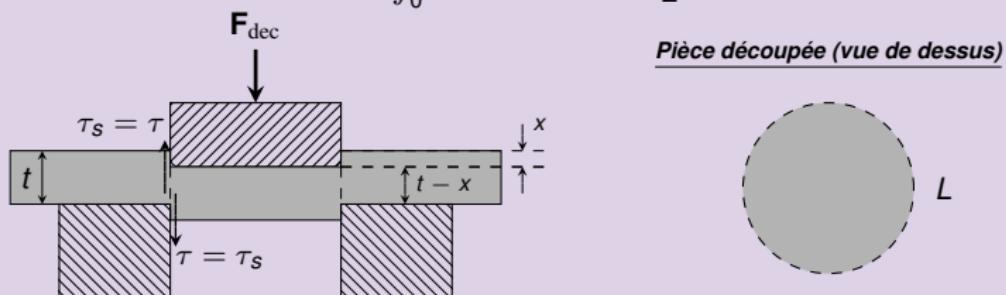
### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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. :

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



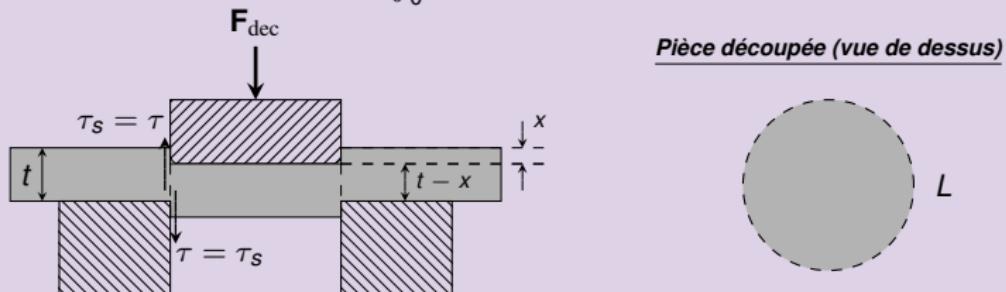
### 3.7.3 Découpage - force et travail

- 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. :

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



▶ Film : ProgressiveStampingDie

### 3.7.4 Pliage, emboutissage et découpage progressif

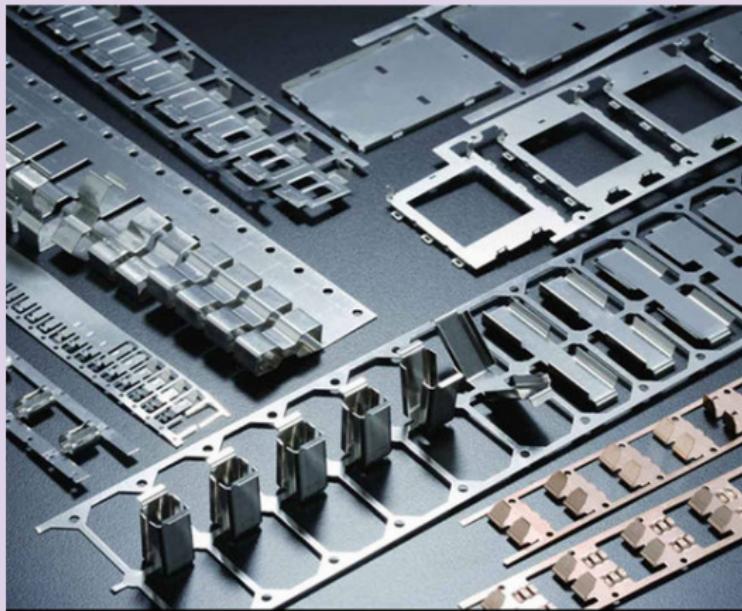
#### Exemple de pièces



*courtesy : Manufacturing Guide*

### 3.7.5 Pliage, emboutissage et découpage progressif

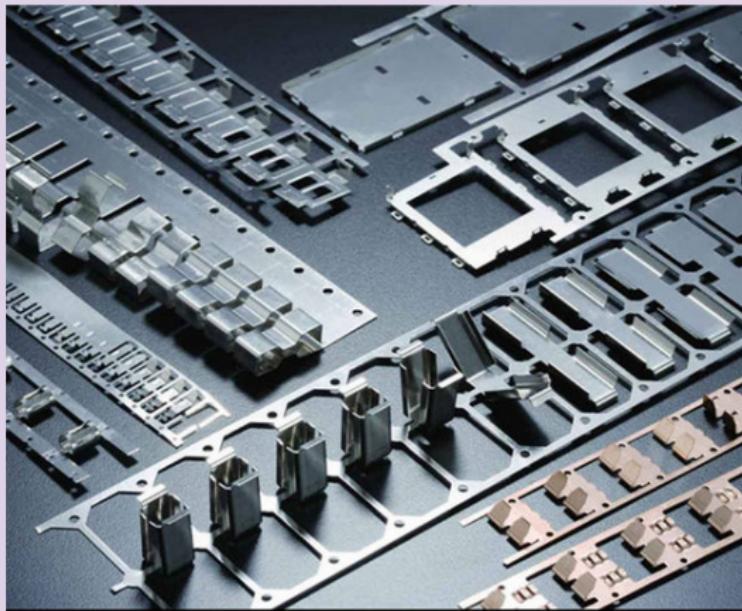
#### Exemple de pièces (suite)



*courtesy : Manufacturing Guide*

### 3.7.5 Pliage, emboutissage et découpage progressif

#### Exemple de pièces (suite)



*courtesy : Manufacturing Guide*

▶ Film : ProgressiveStampingDie.mp4

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

# Terminologie anglaise

<b><i>Français</i></b>	<b><i>Anglais</i></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>

# Terminologie anglaise

<b><i>Français</i></b>	<b><i>Anglais</i></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>

# Terminologie anglaise

<b><i>Français</i></b>	<b><i>Anglais</i></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>

◀ retour

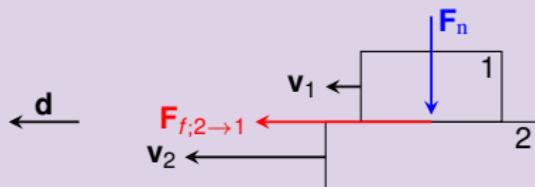
# Modèle de frottements Coulombien

## 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  $F_n$

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

- Dans cette relation,  $\mu$  est le coefficient de **frottement dynamique**



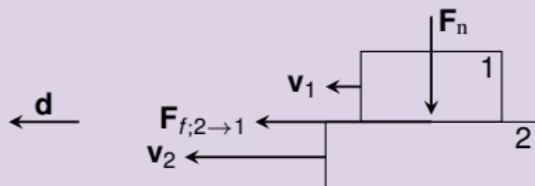
# Modèle de frottements Coulombien

## 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  $F_n$

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

- 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) :



# Modèle de frottements Coulombien

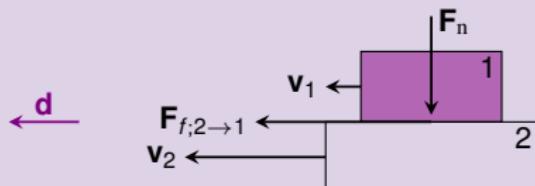
## Expression de la force de frottement

- 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  $F_n$

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

- 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) :

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



# Modèle de frottements Coulombien

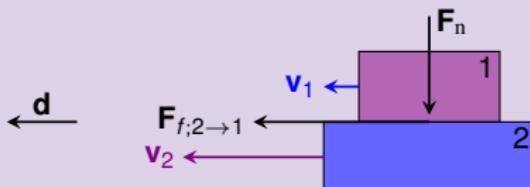
## Expression de la force de frottement

- 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  $F_n$

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

- 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) :

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



# Modèle de frottements Coulombien

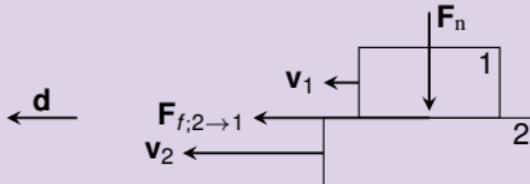
## Expression de la force de frottement

- 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  $F_n$

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

- 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) :

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



▶ Formule frottements coulombiens aux Tableaux

# Modèle de frottements Coulombien

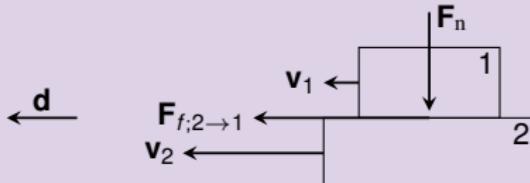
## Expression de la force de frottement

- 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  $F_n$

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

- 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) :

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



◀ retour

# Condition de tréfilage

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

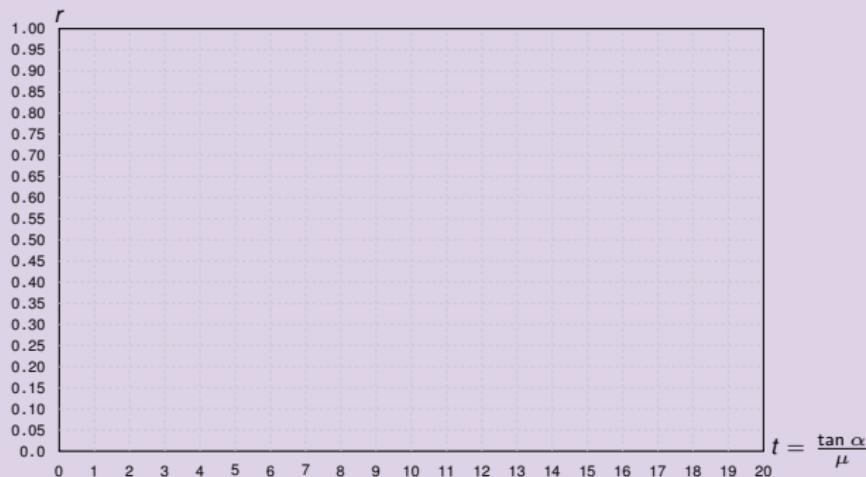
$$r \geq G\left(\frac{\tan \alpha}{\mu}\right) \text{ où } G(t) = \left(\frac{t}{1+t}\right)^t$$

- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r)$

# Condition de tréfilage

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

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



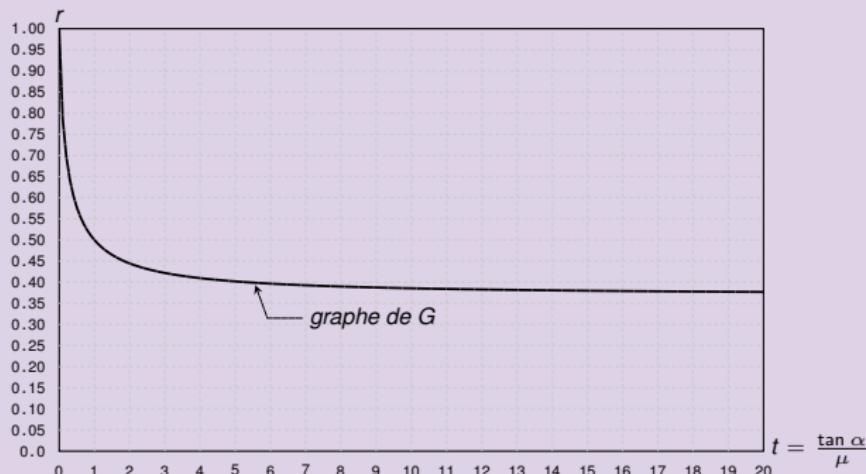
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq l_m(r)$

On considère le plan des couples  $(t, r)$  rapport de conception-facteur de tréfilage

# Condition de tréfilage

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

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



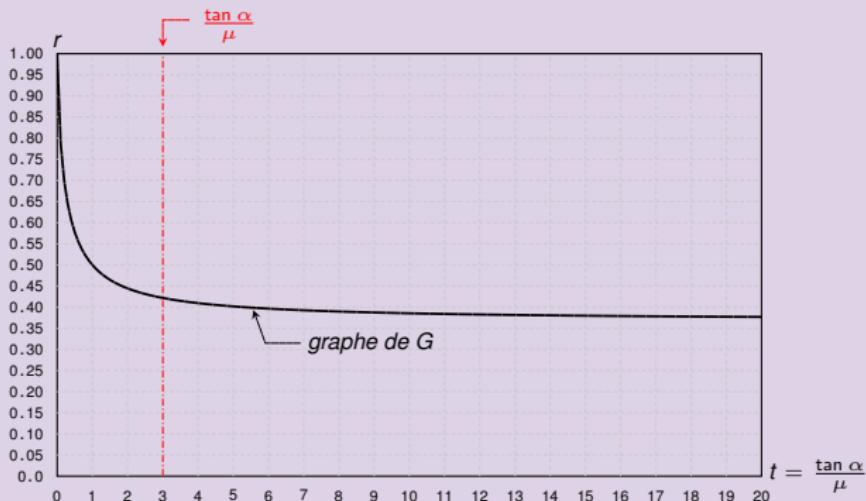
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq \ln(r)$

Dans ce plan, on dessine le graphe de la fonction  $r = G(t)$

# Condition de tréfilage

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

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



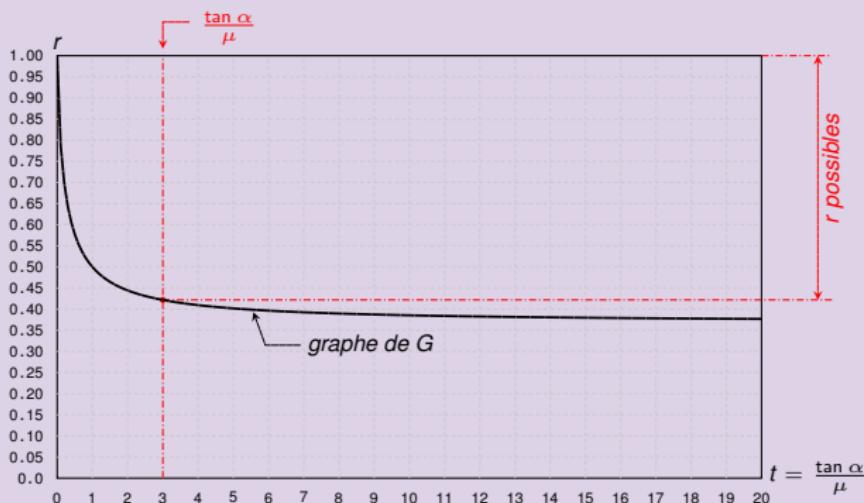
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq \ln(r)$

Si le rapport de conception est donné, les facteurs de tréfilage possibles se trouvent au dessus du graphe.

# Condition de tréfilage

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

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



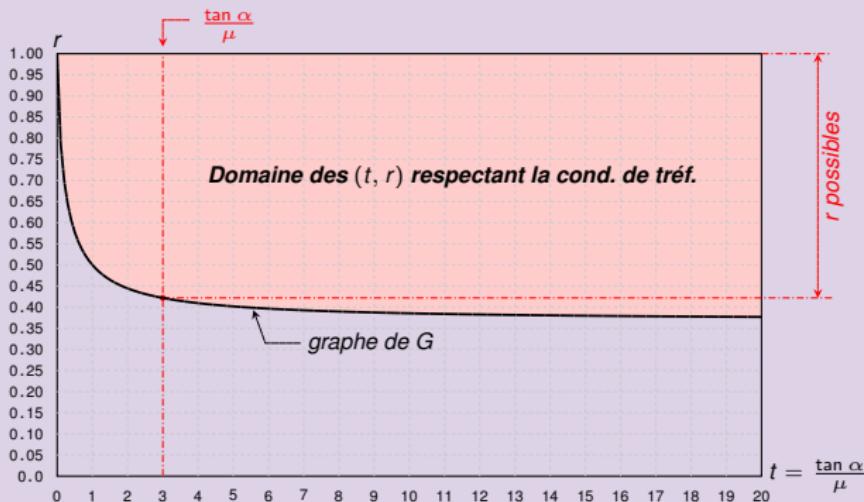
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq l_m(r)$

Si le rapport de conception est donné, les facteurs de tréfilage possibles se trouvent au dessus du graphe

# Condition de tréfilage

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

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

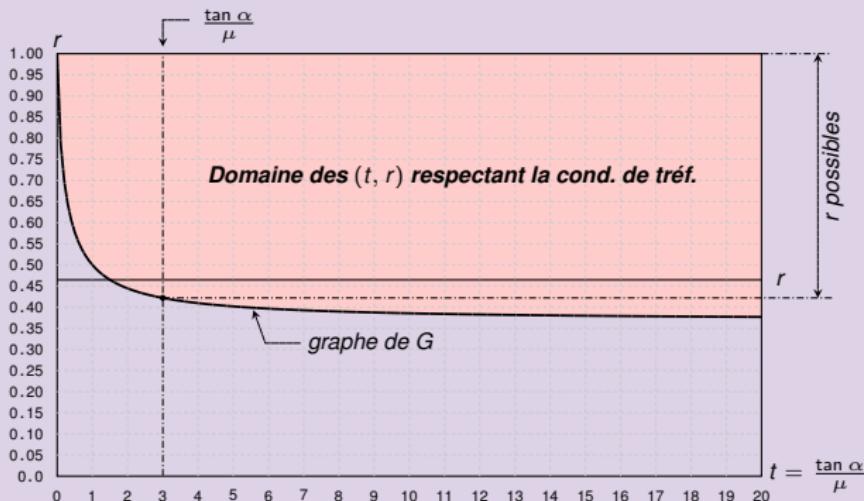


- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq l_m(r)$

# Condition de tréfilage

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

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



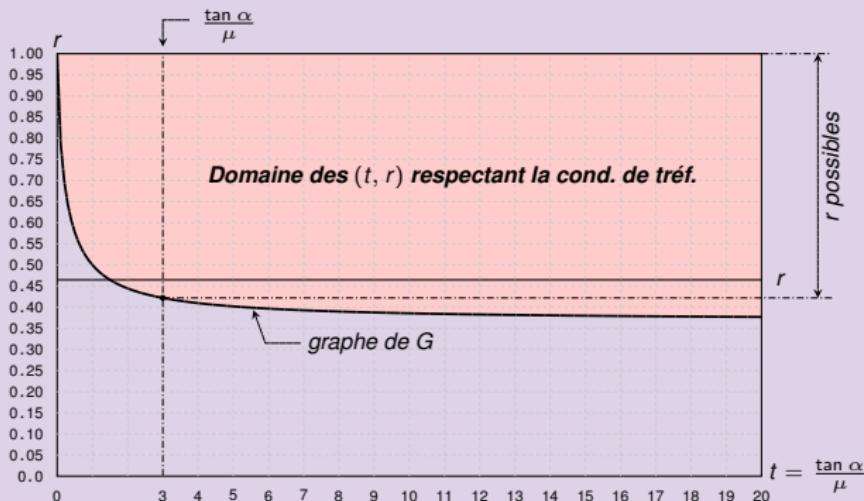
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq l_m(r)$

Une situation classique est celle où le facteur de tréfilage  $r = A_f/A_0$  est imposé

# Condition de tréfilage

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

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



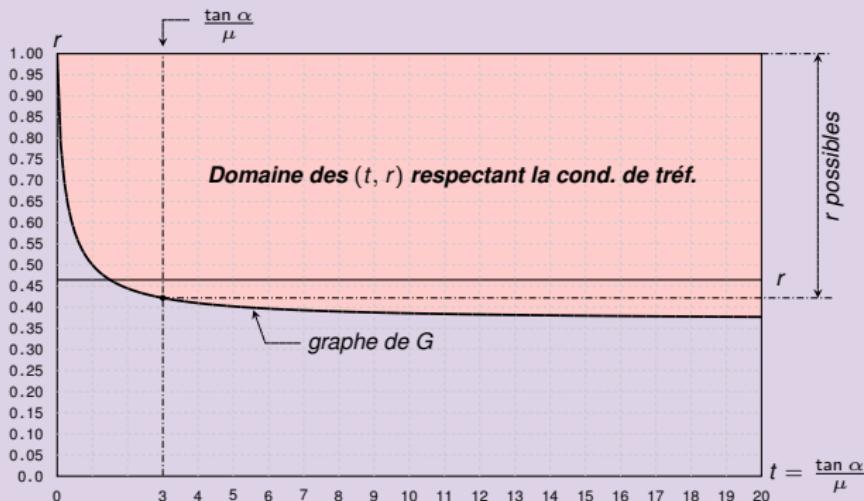
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r)$

La question est de déterminer l'angle d'ouverture avec lequel on doit tailler l'outil : il doit être assez grand

# Condition de tréfilage

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

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



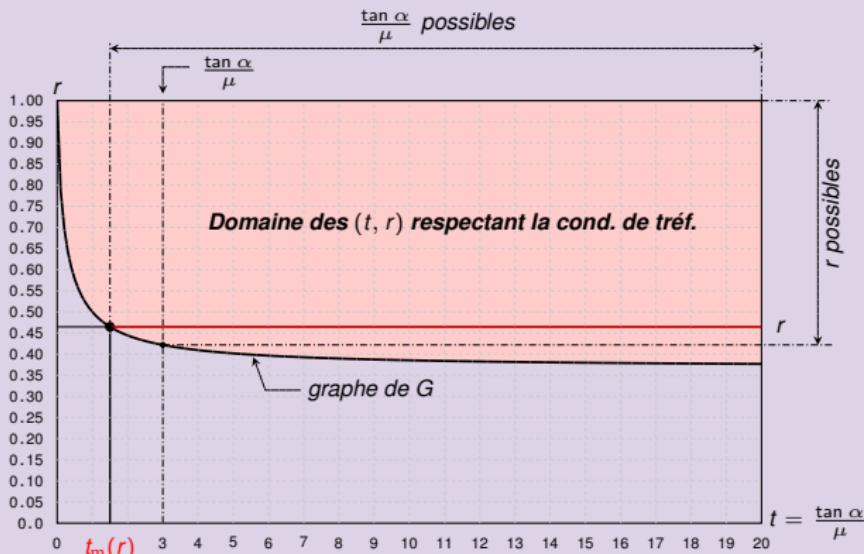
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r)$

La question est de déterminer l'angle d'ouverture avec lequel on doit tailler l'outil : il doit être assez grand

# Condition de tréfilage

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

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



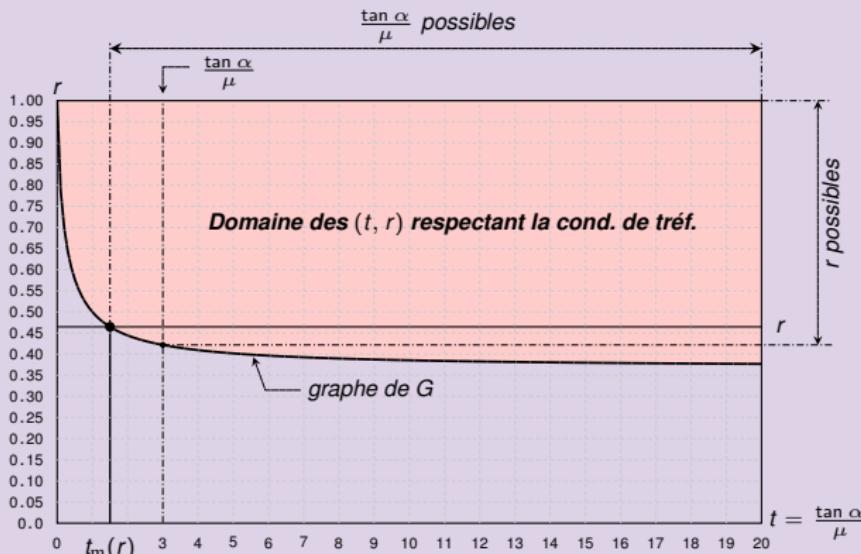
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \Rightarrow \alpha \geq \alpha_m(r, \mu)$

Il faut que  $t = \tan \alpha / \mu$  soit plus grand qu'une certaine valeur dépendant de  $r$  :  $t_m(r)$

# Condition de tréfilage

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

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



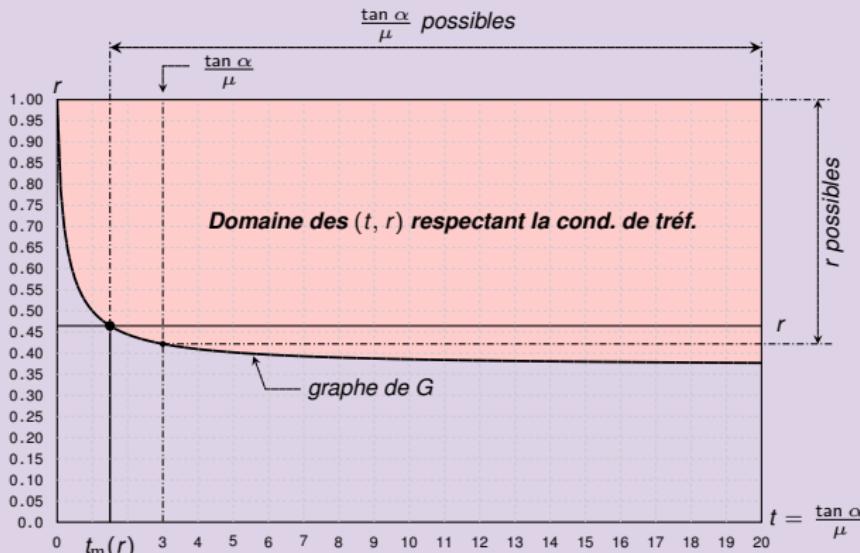
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \Rightarrow \alpha \geq \alpha_m(r, \mu)$

Pour que  $t = \tan \alpha / \mu$  soit plus grand qu'une certaine valeur, il faut en effet que  $\alpha$  lui-même soit assez grand

# Condition de tréfilage

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

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



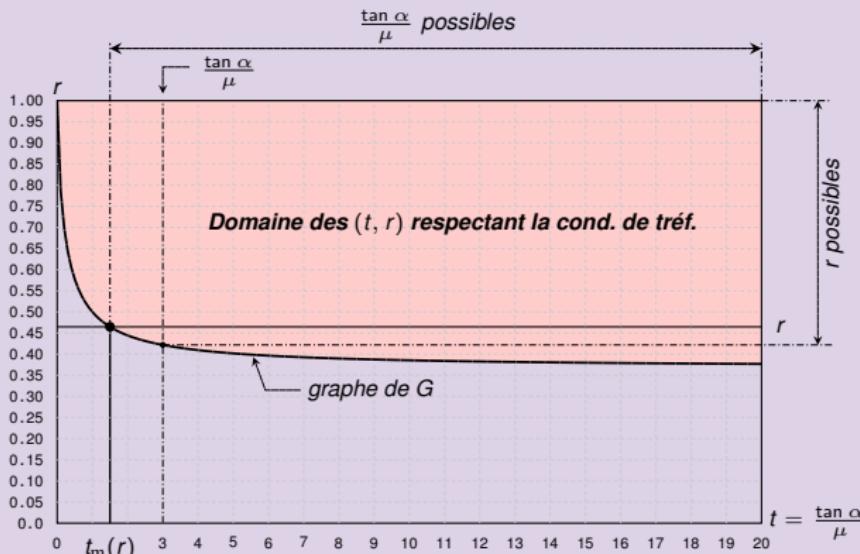
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r)$

Pour que  $t = \tan \alpha / \mu$  soit plus grand qu'une certaine valeur, il faut en effet que  $\alpha$  lui-même soit assez grand

# Condition de tréfilage

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

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



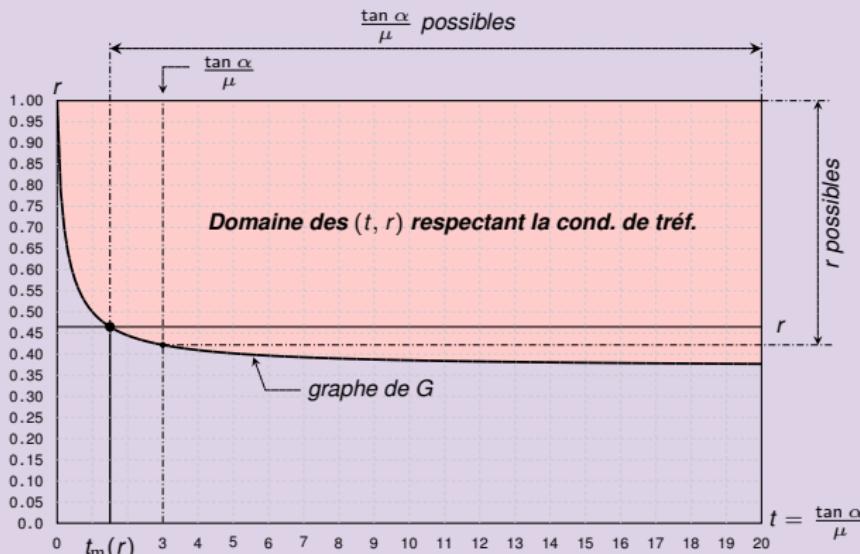
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

Pour trouver la valeur de la borne  $\alpha_m$ , il faut résoudre cette inéquation pour  $\alpha$  (valeur limite)

# Condition de tréfilage

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

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



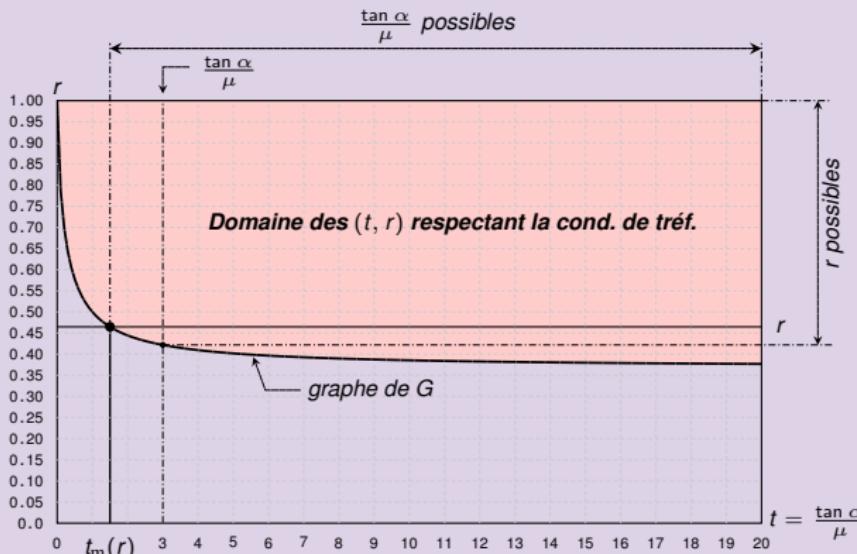
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

Pour trouver la valeur de la borne  $\alpha_m$ , il faut résoudre cette inéquation pour  $\alpha$  (valeur limite)

# Condition de tréfilage

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

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



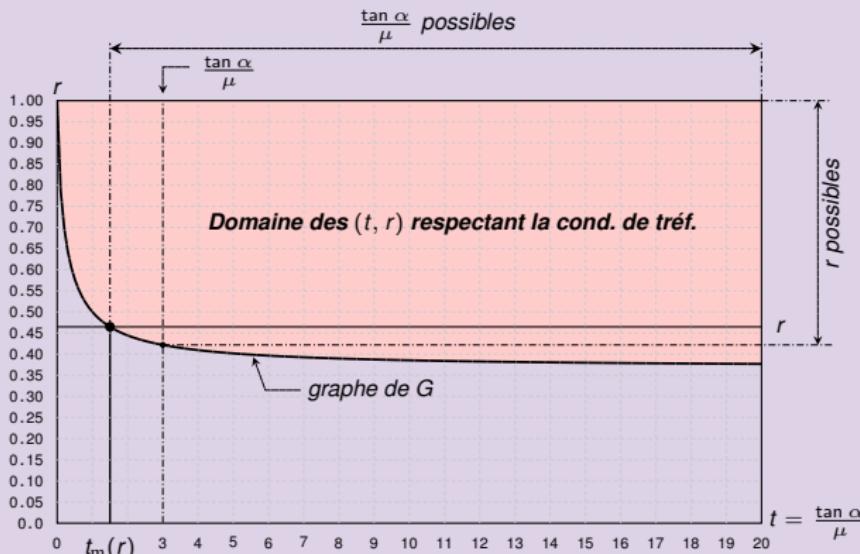
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

Pour trouver la valeur de la borne  $\alpha_m$ , il faut résoudre cette inéquation pour  $\alpha$  (valeur limite)

# Condition de tréfilage

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

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

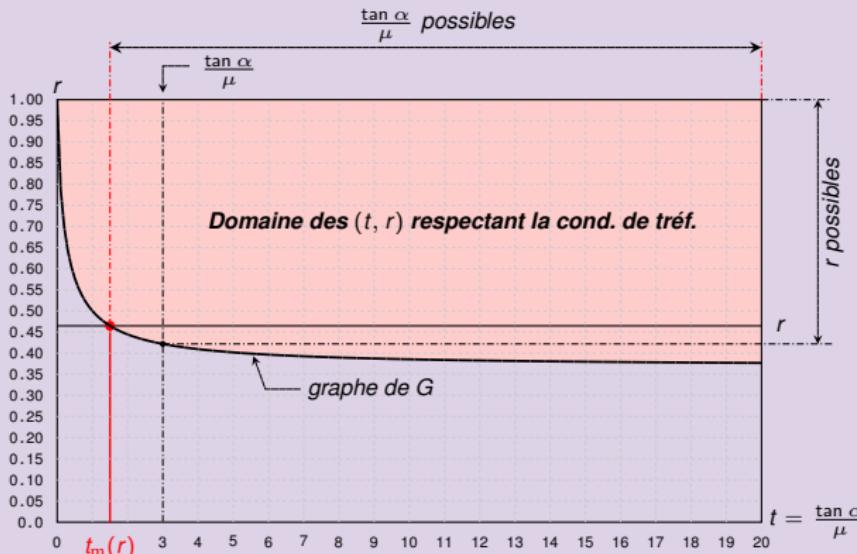


- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

# Condition de tréfilage

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

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



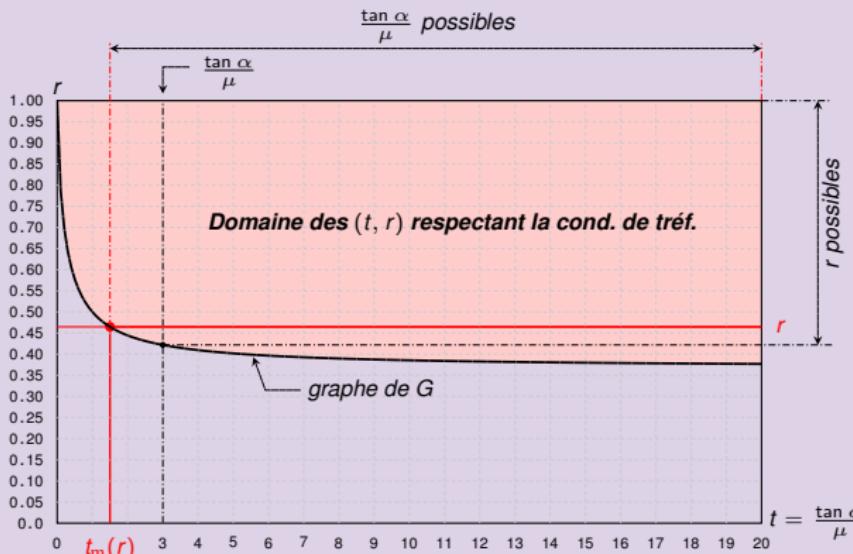
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

Il nous reste à déterminer la borne  $t_m(r)$  ?

# Condition de tréfilage

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

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



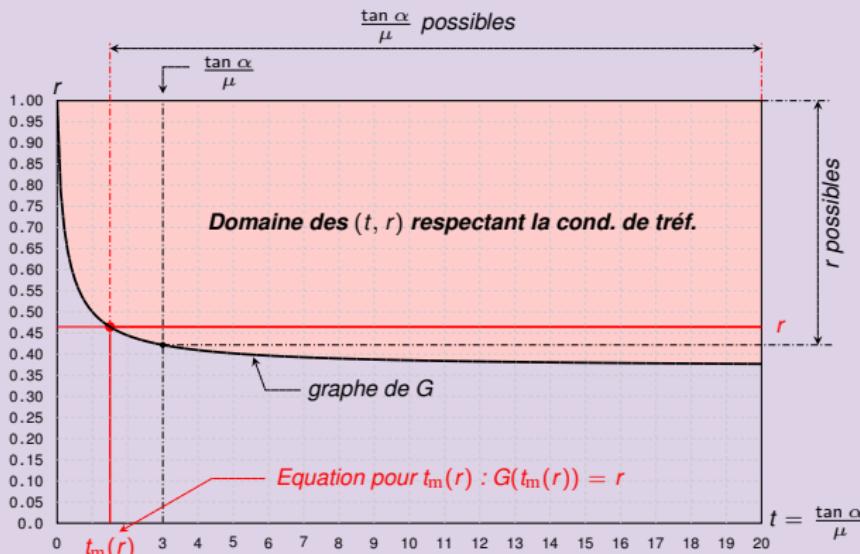
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

On voit que  $t_m(r)$  est l'abscisse  $t$  tel que  $G(t) = r$

# Condition de tréfilage

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

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



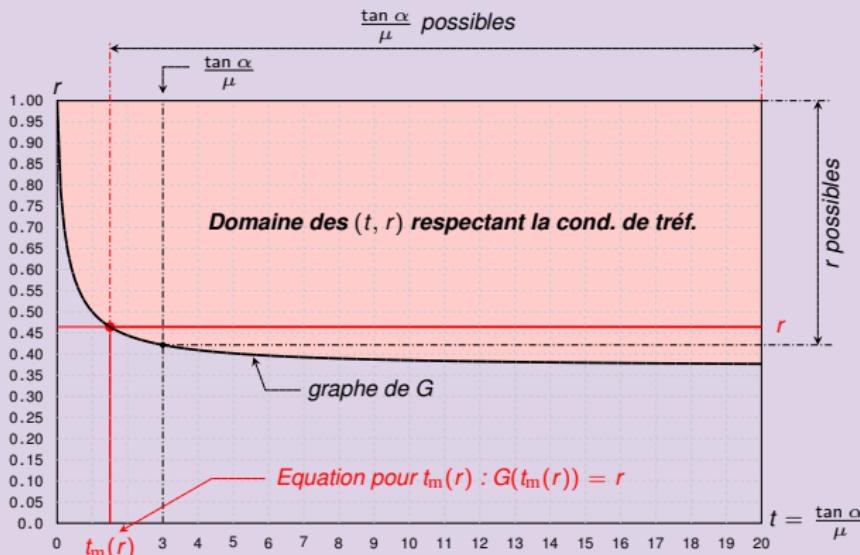
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

On voit que  $t_m(r)$  est l'abscisse  $t$  tel que  $G(t) = r$

# Condition de tréfilage

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

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



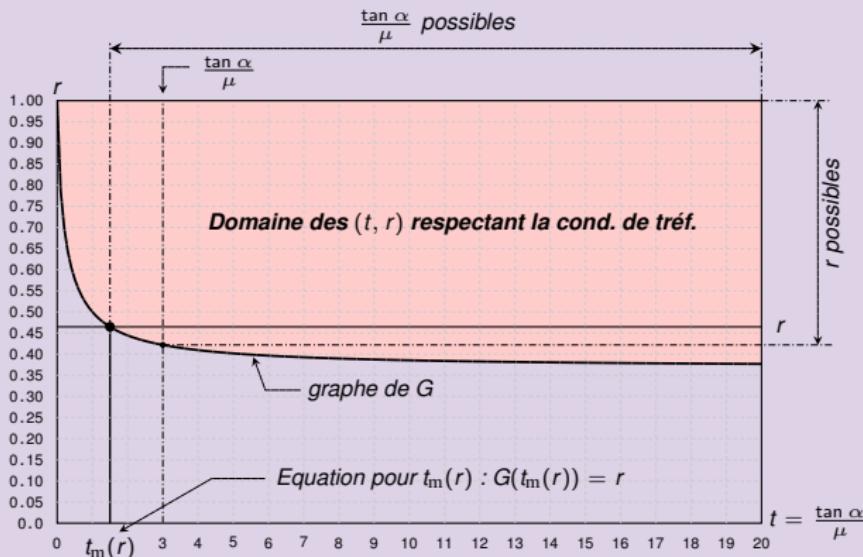
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

► Equation pour  $t_m(r)$  aux Tableaux et résolution

# Condition de tréfilage

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

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

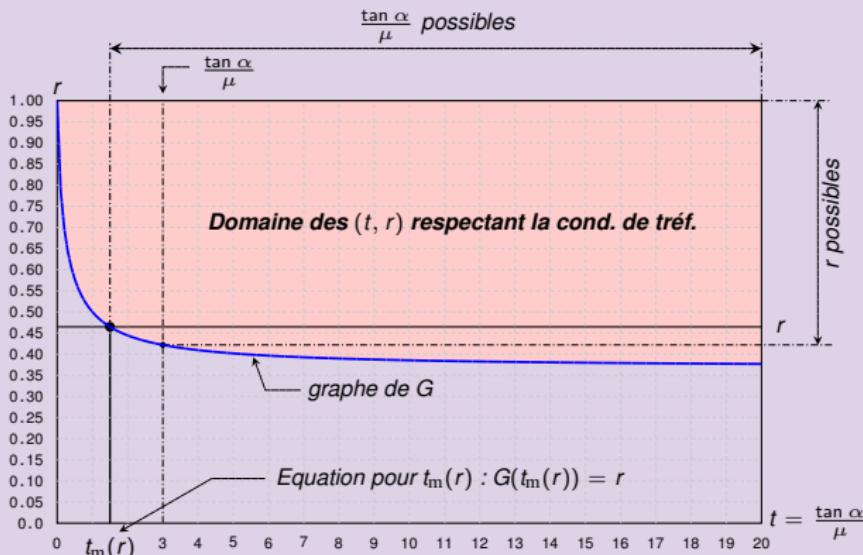


- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

# Condition de tréfilage

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

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



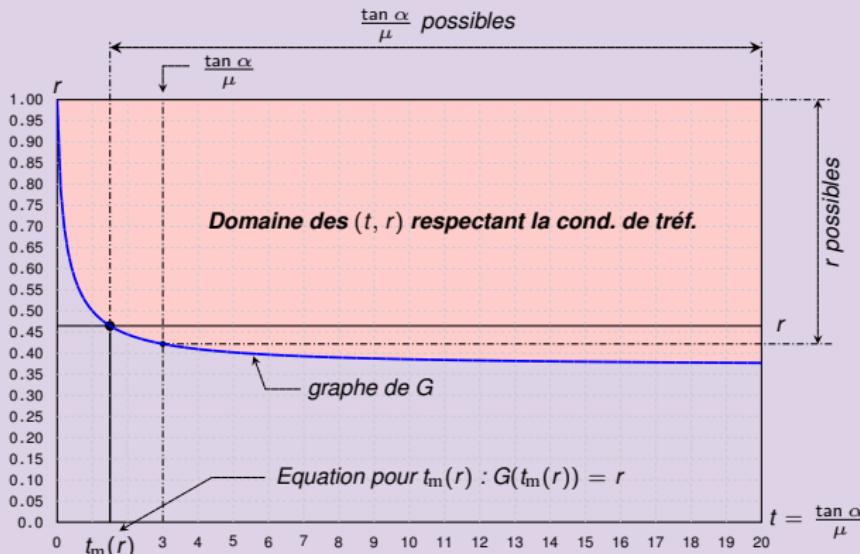
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

On observe que si  $r$  est trop petit l'équation  $G(t) = r$  n'a plus de solution

# Condition de tréfilage

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

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



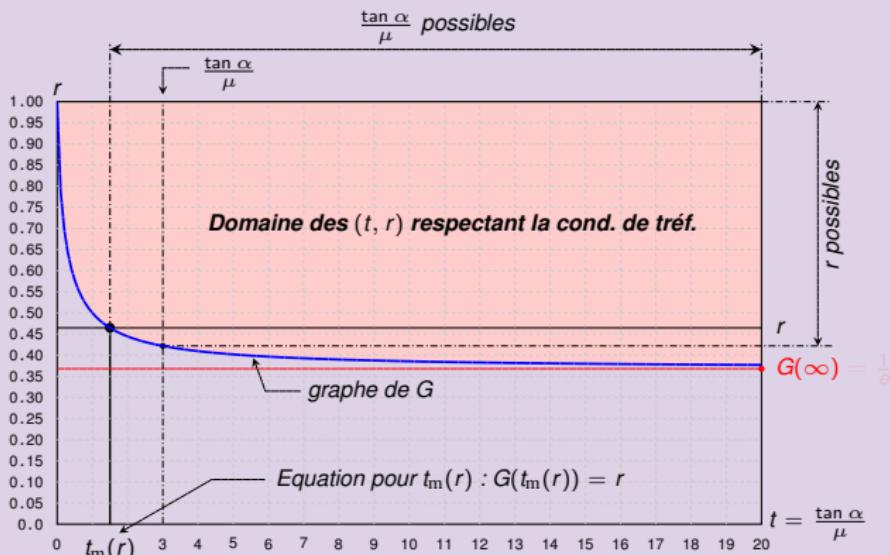
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

La valeur limite pour  $r$  est  $\min_{t>0} G(t)$ , soit  $\text{CH} \times 1$  puisque  $G$  est décroissante

# Condition de tréfilage

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

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



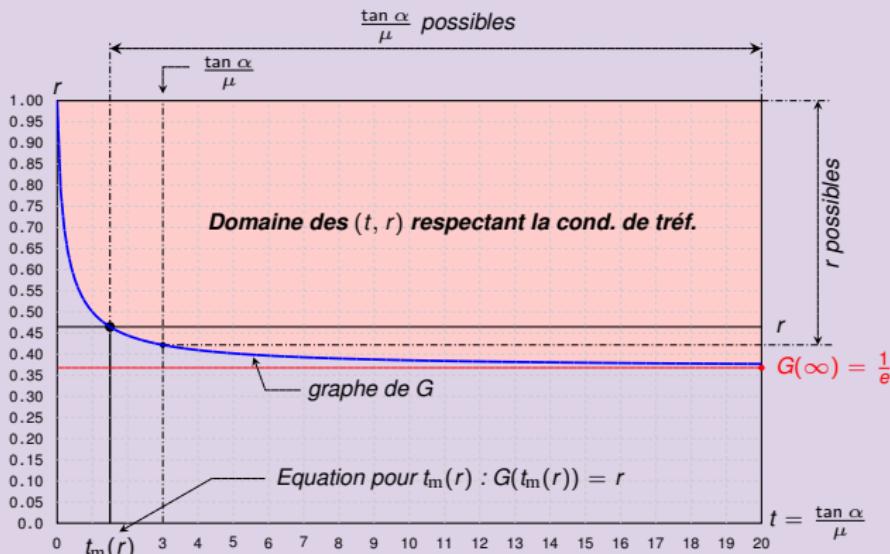
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

La valeur limite pour  $r$  est  $\min_{t>0} G(t)$ , soit  $G(\infty)$  puisque  $G$  est décroissant

# Condition de tréfilage

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

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



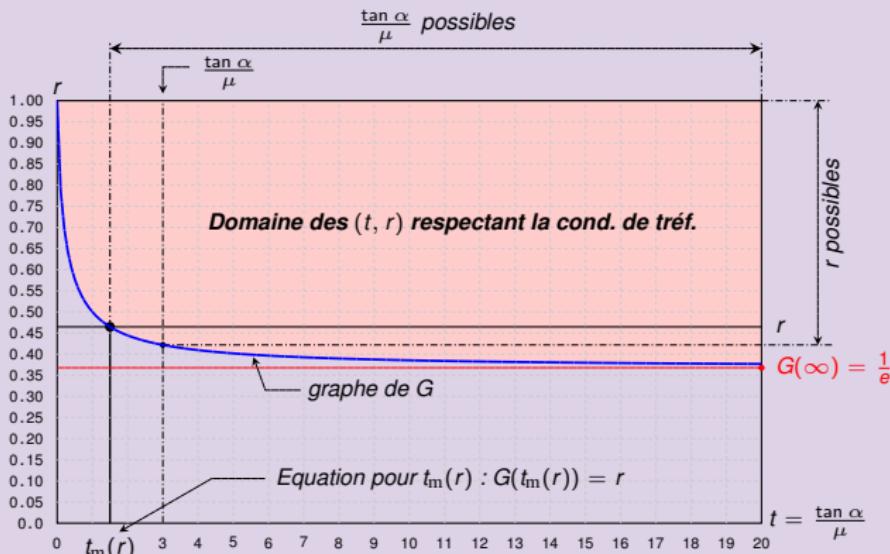
- Borne sur le rapport de conception :  $\frac{\tan \alpha}{\mu} \geq t_m(r) \implies \alpha \geq \alpha_m(r, \mu) \equiv \arctan \mu t_m(r)$

On peut vérifier que  $G(\infty) = e^{-1}$ . Cela veut dire qu'on ne peut pas accomoder des rapports de tréfilage  $> e^{-1}$

# Condition de tréfilage

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

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



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

On peut vérifier que  $G(\infty) = e^{-1}$ . Cela veut dire qu'on ne peut pas accomoder des rapports de tréfilage  $\leq e^{-1}$

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- A cause de la forme compliquée de  $G$ , cette équation est transcendante. Pour la résoudre on procéde de la manière suivante:
  - on pose  $t_m = -\frac{1}{\mu}$
  - on applique l'algorithme itératif  $t_{m+1} = -\frac{1}{\mu G(t_m)}$ , pour  $m = 0, 1, 2, \dots$
- Cet algorithme converge vers la solution  $t$  de (24) pour autant qu' elle existe.
- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- Cet algorithme converge vers la solution  $t$  de (24) pour autant qu' elle existe.
- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- Cet algorithme converge vers la solution  $t$  de (24) pour autant qu' elle existe.
- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- Cet algorithme converge vers la solution  $t$  de (24) pour autant qu'elle existe.

- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

◀ retour

▶ Sous quelle condition sur  $r$  existe-t-il une solution à (24) ?

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

Remarque que cette valeur dépend du coefficient de rebondissement  $\mu$ .

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

Notez que cette valeur dépend du coefficient de frottement  $\mu$ .

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

Notez que cette valeur dépend du coefficient de frottement  $\mu$ .

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

- 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 :

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

Notez que cette valeur dépend du coefficient de frottement  $\mu$ .

# 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 solution  $t$  de l'équation la solution  $t$  de

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

- 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  $m = 0, 1, 2 \dots$

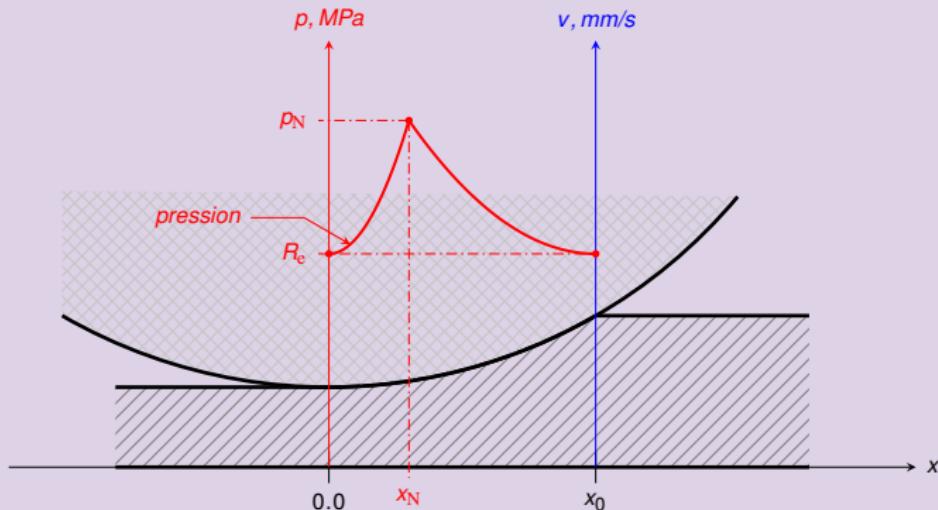
- Cet algorithme converge vers la solution  $t$  de (24) pour autant qu'elle existe (i.e. si  $r > 1/e$ ).
- Une fois que la valeur minimale  $t_m(r)$  du rapport de conception  $\frac{\tan \alpha}{\mu}$  est connue, on trouve la valeur minimale  $\alpha_m(r, \mu)$  à donner au demi-angle d'ouverture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

$$\alpha_m(r, \mu) = \arctan \mu t_m(r). \quad (25)$$

Notez que cette valeur dépend du coefficient de frottement  $\mu$ .

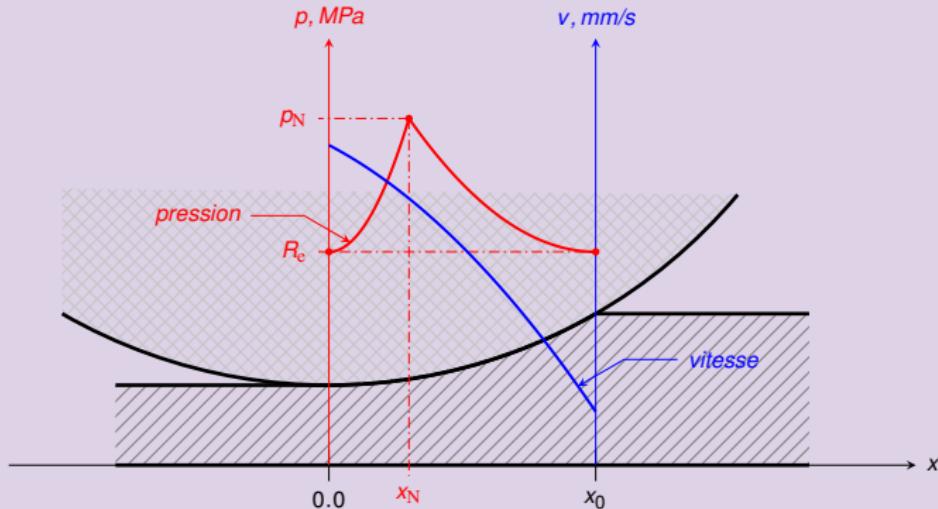
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage



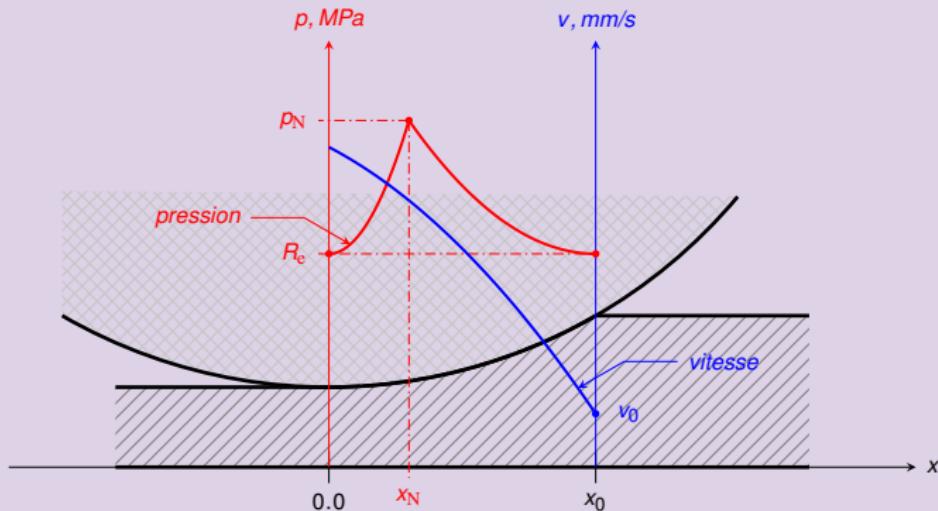
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage



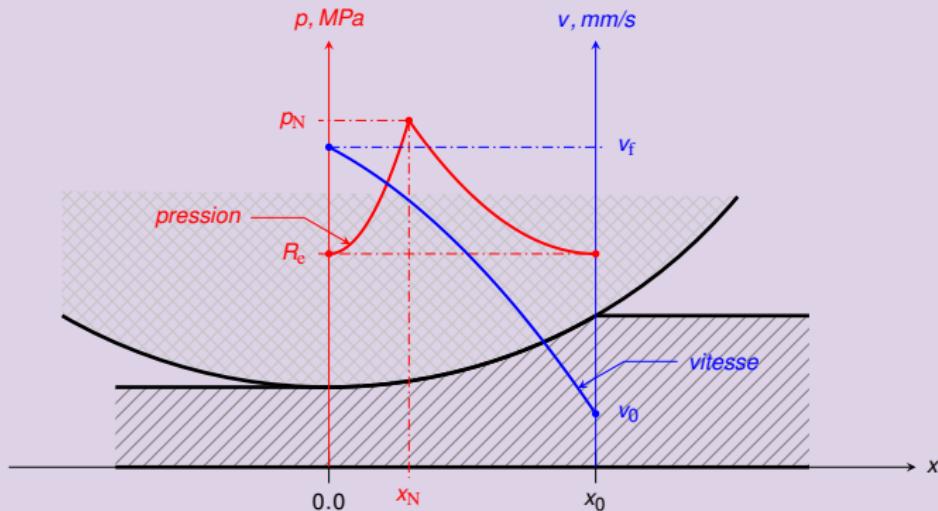
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage



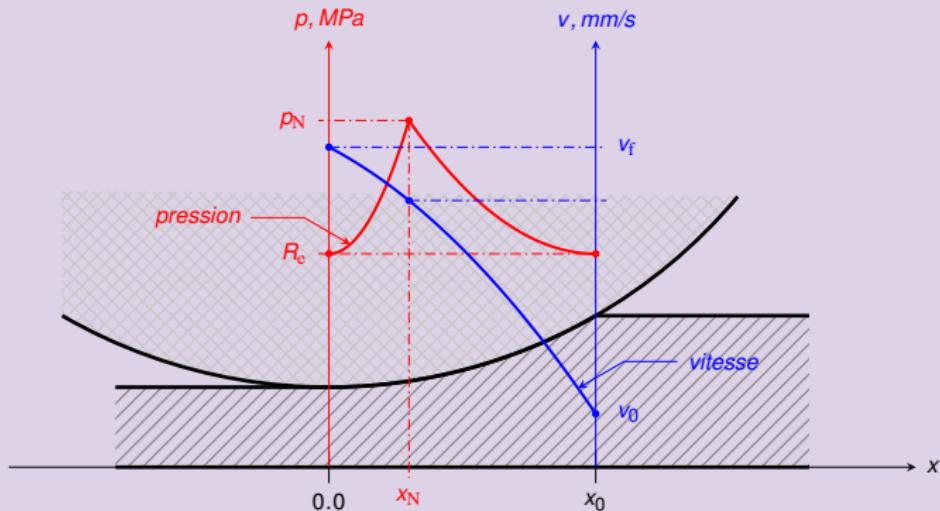
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage



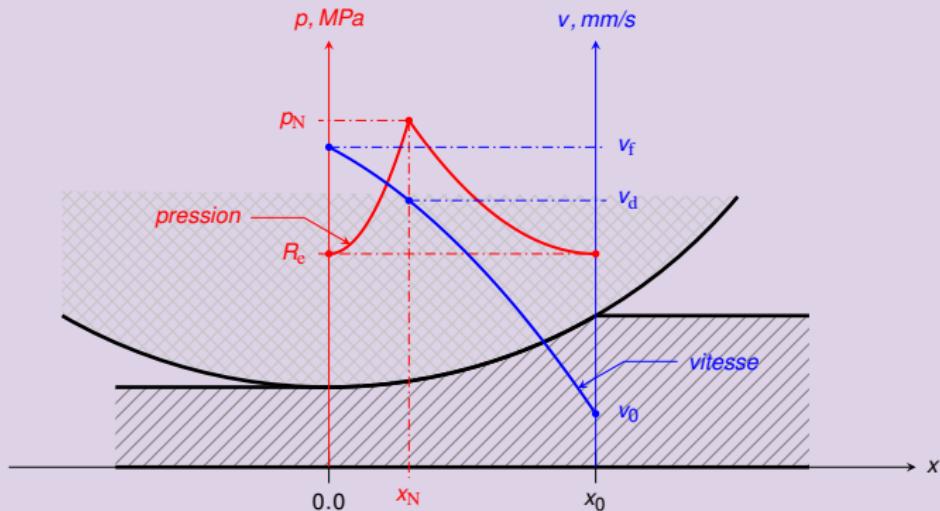
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage



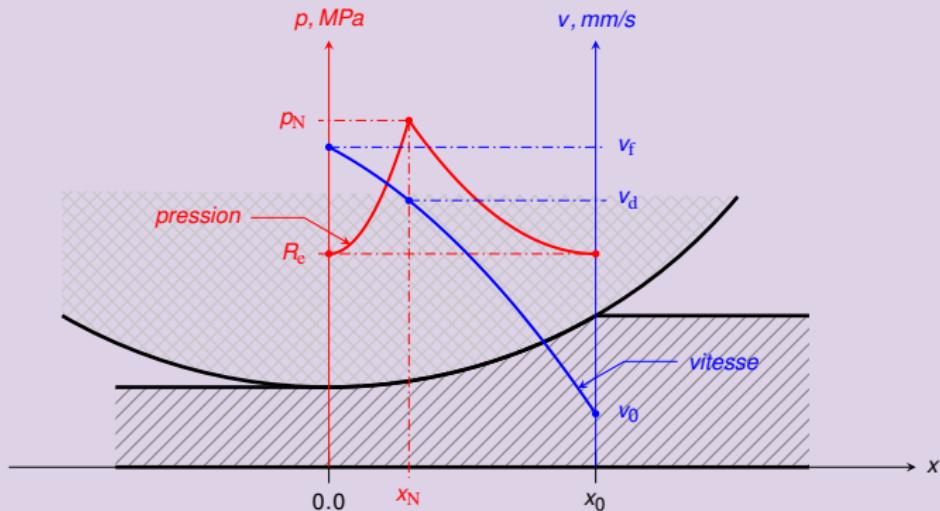
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage



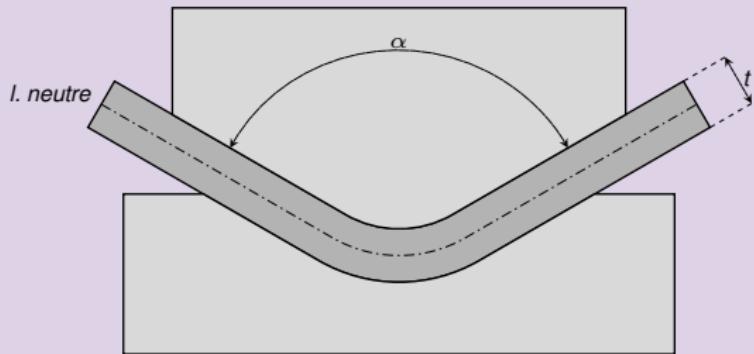
# Théorie du point neutre en laminage

## Colline de pression et vitesses de laminage

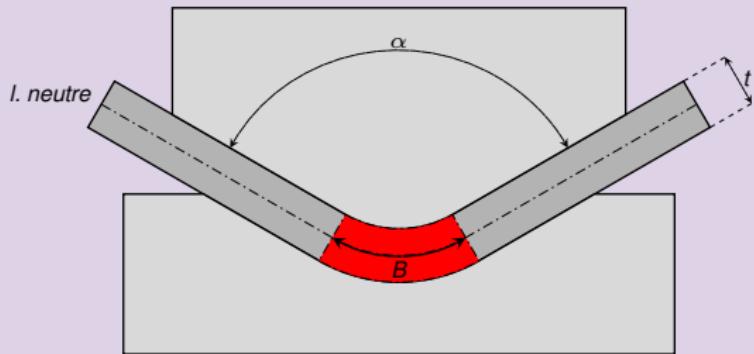


◀ retour

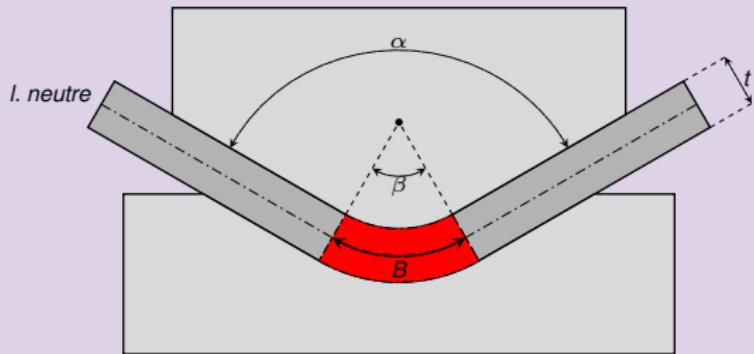
# Réserve de pliage



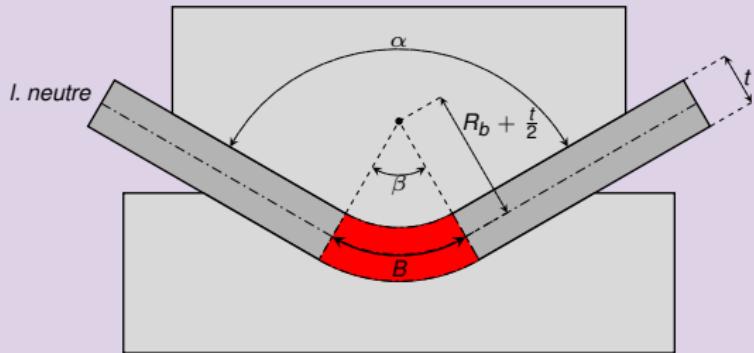
# Réserve de pliage



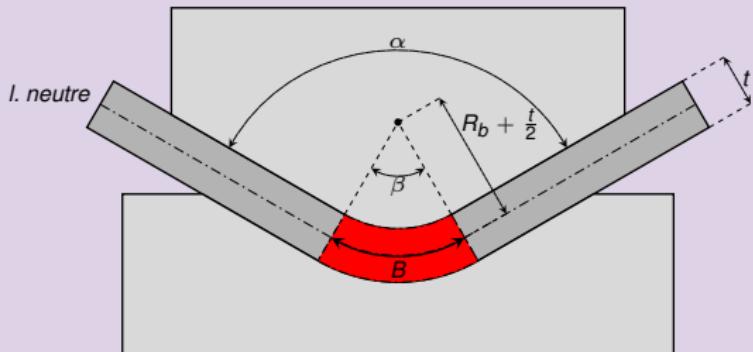
# Réserve de pliage



# Réserve de pliage



# Réserve de pliage

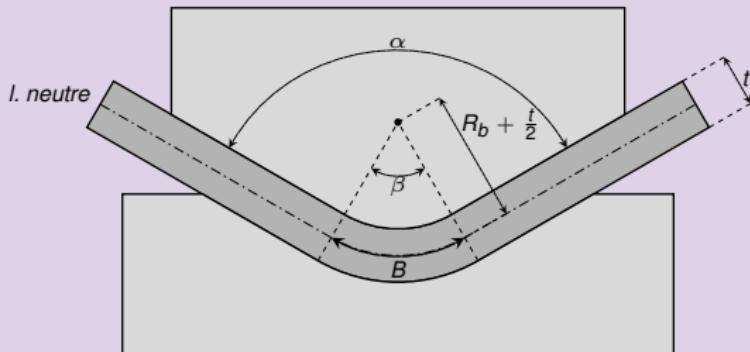


- On observe que :

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

- Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  ont des cotés perpendiculaires deux à deux.

# Réserve de pliage

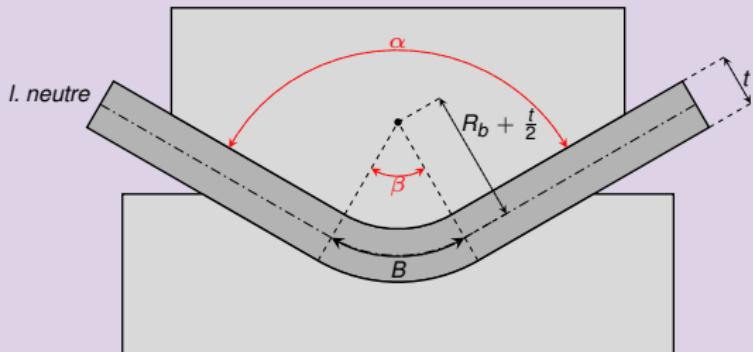


- *On observe que :*

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

- *Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  ont des cotés perpendiculaires deux à deux.*

# Réserve de pliage

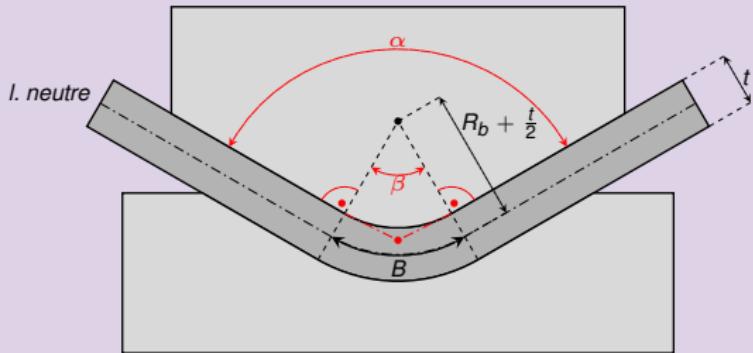


- On observe que :

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

- Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  ont des cotés perpendiculaires deux à deux. Ils ne sont pas égaux mais

# Réserve de pliage

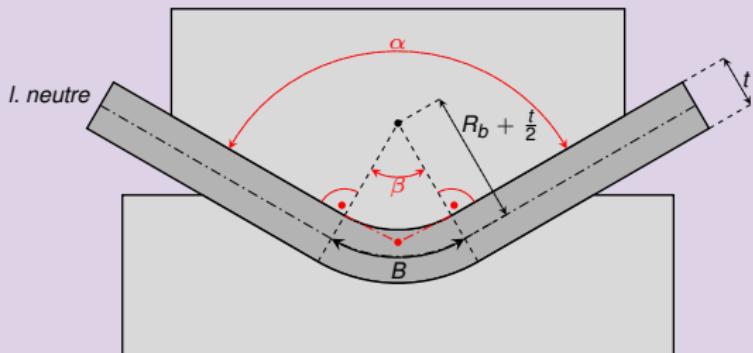


- On observe que :

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

- Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  ont des cotés perpendiculaires deux à deux. Ils ne sont pas égaux mais

# Réserve de pliage

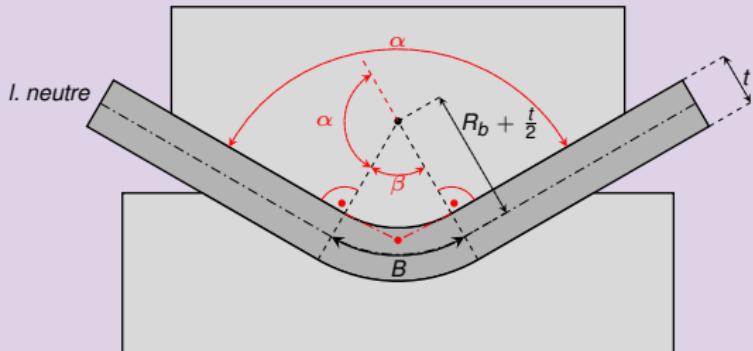


- On observe que :

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

- Les angles  $\beta$  et  $\alpha$  ont des cotés perpendiculaires deux à deux. Ils ne sont pas égaux mais complémentaires à  $\pi$  :

# Réserve de pliage

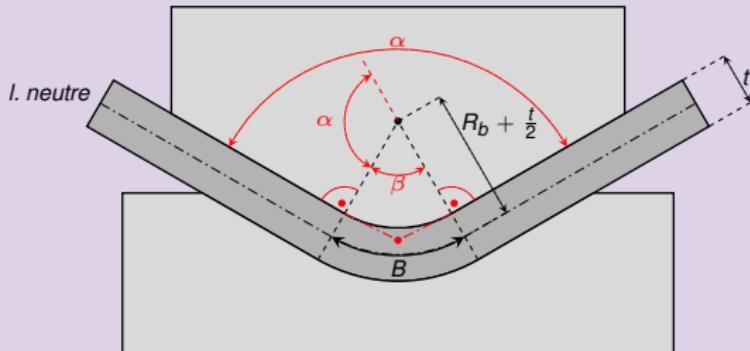


- On observe que :

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

- 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  $\beta = \pi - \alpha$ .

# Réserve de pliage

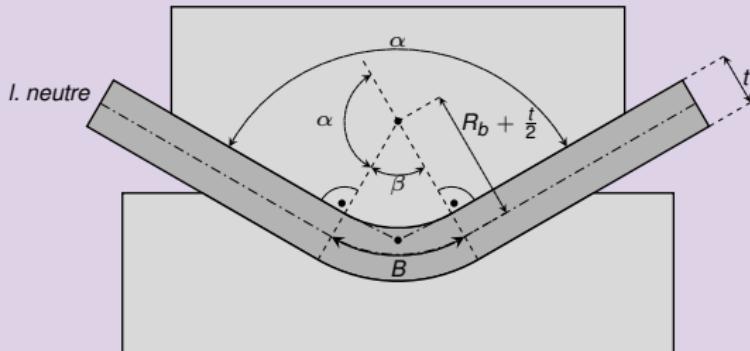


- On observe que :

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

- 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  $\beta = \pi - \alpha$ .

# Réserve de pliage

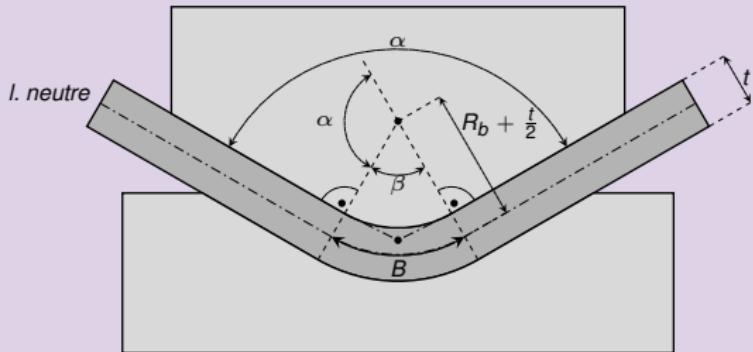


- On observe que :

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

- 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  $\beta = \pi - \alpha$ .

# Réserve de pliage



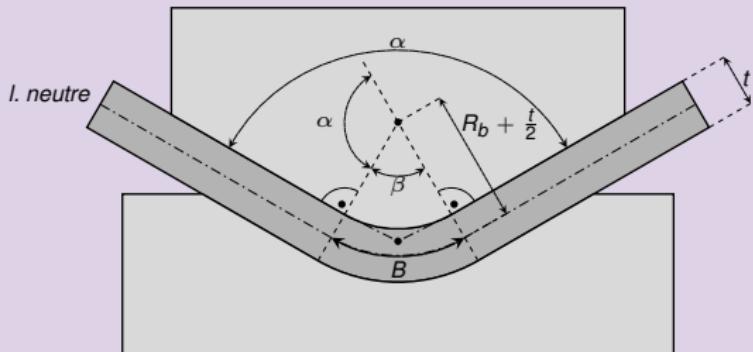
- On observe que :

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

- 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

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

# Réserve de pliage



- On observe que :

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

- 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

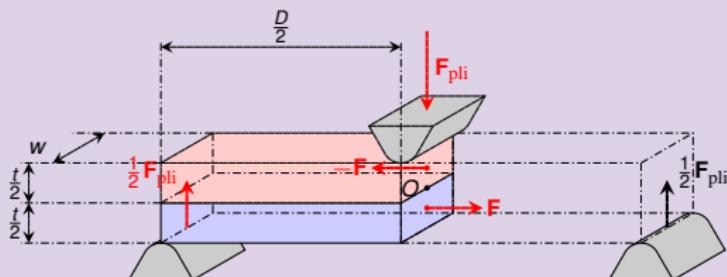
$$B = (\pi - \alpha)(R_b + \frac{t}{2})$$

◀ retour

# Calcul de la force de pliage

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



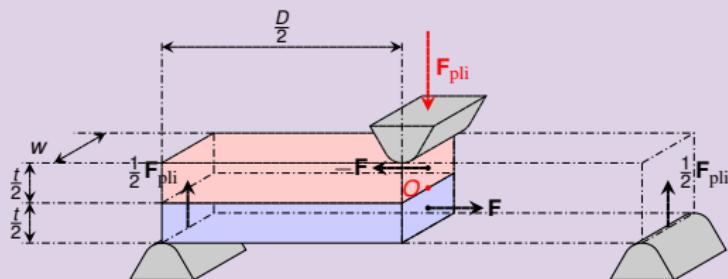
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

$$-\frac{1}{2}F_{\text{pli}} \frac{1}{2}D$$

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



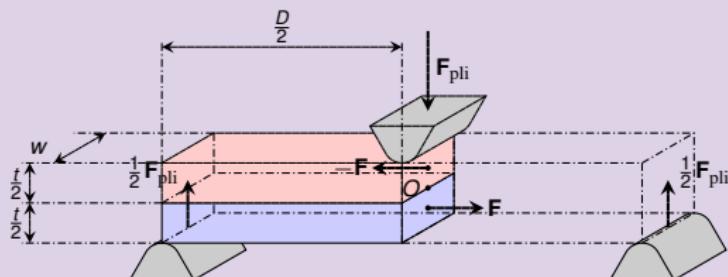
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

$$-\frac{1}{2}F_{\text{pli}} \frac{1}{2}D$$

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



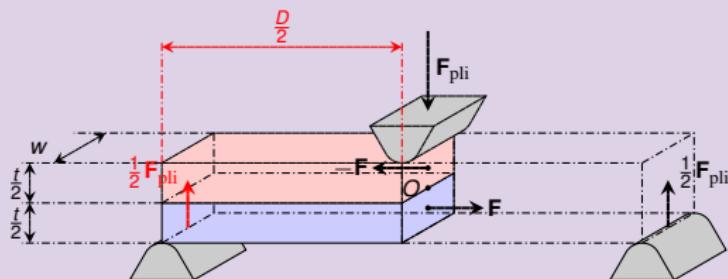
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

$$-\frac{1}{2}F_{\text{pli}} \frac{1}{2}D$$

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



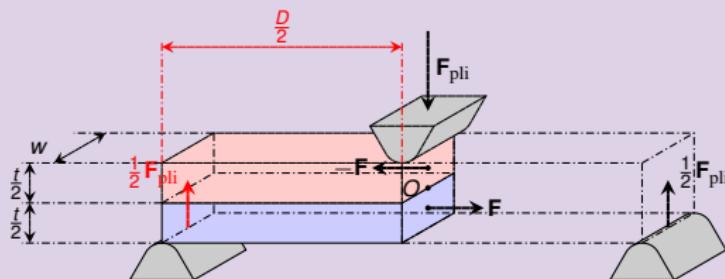
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

$$-\frac{1}{2}F_{\text{pli}} \frac{1}{2}D + F \frac{t}{2}$$

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



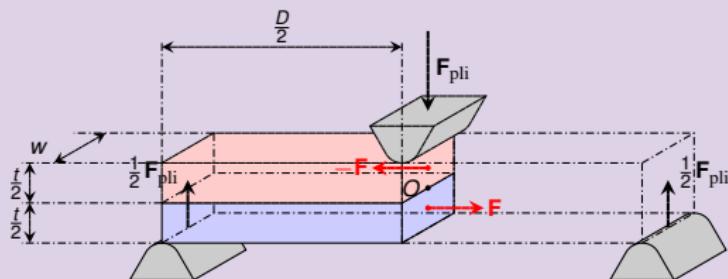
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

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

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



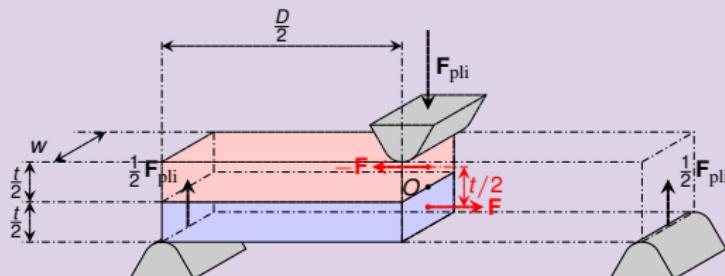
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

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

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



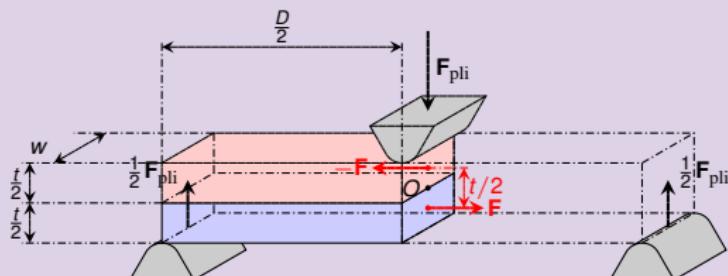
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

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

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w\frac{t}{2}}$$



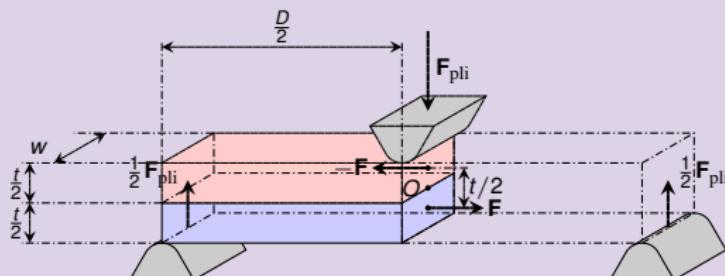
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F_{\text{pli}}$

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w\frac{t}{2}}$$



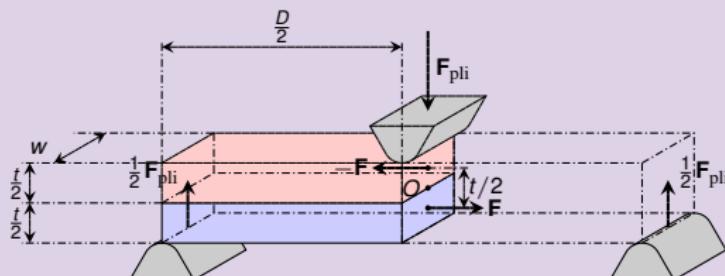
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

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

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



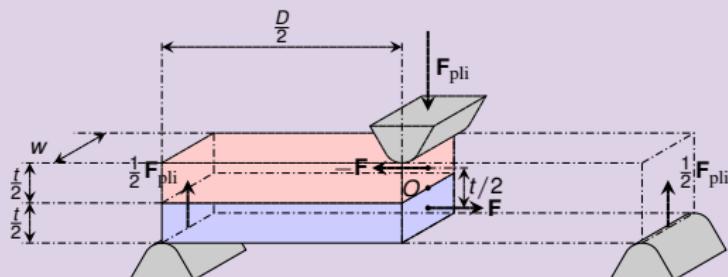
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F$  :

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

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

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{w \frac{t}{2}}$$



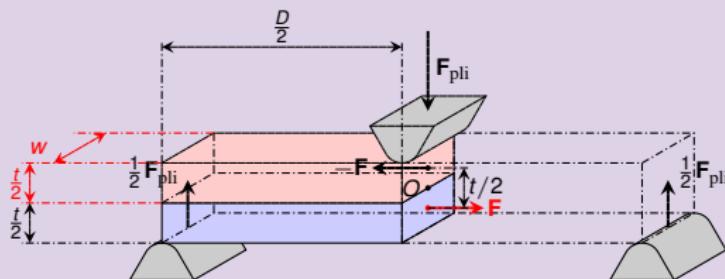
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F_{\text{pli}}$

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



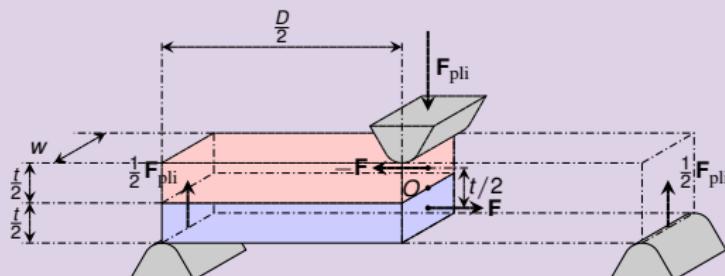
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F_{\text{pli}}$

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



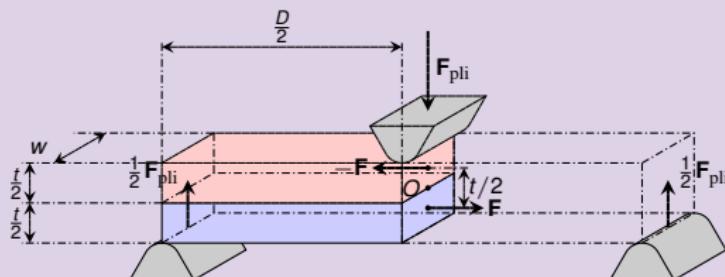
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F_{\text{pli}}$

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



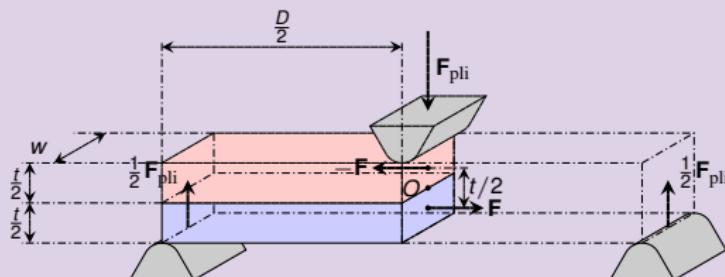
# Calcul de la force de pliage

- 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  $F_{\text{pli}}$

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



# 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

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

# 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

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

◀ retour

# 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  $F$  :

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

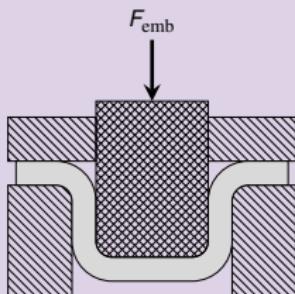
- La contrainte de traction/compression sur la section dr. se déduit ensuite de  $F_{\text{pli}}$

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

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

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

# Calcul de la force d'emboutissage



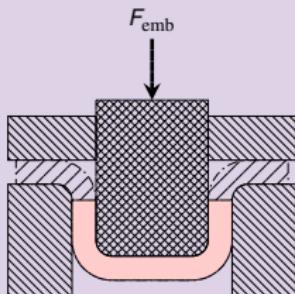
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}}$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



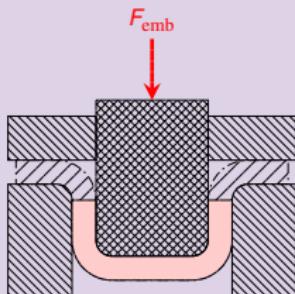
- *Equilibre des forces sur le **flan dans la matrice** dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}}$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



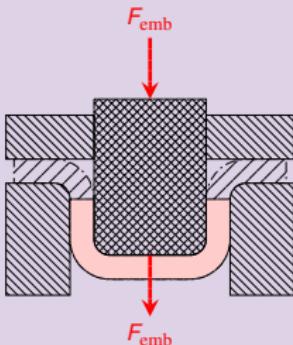
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}}$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



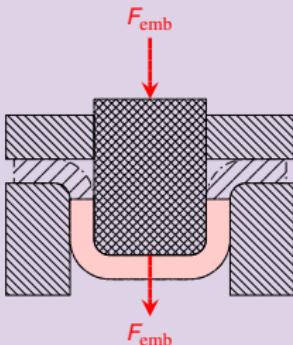
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}}$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



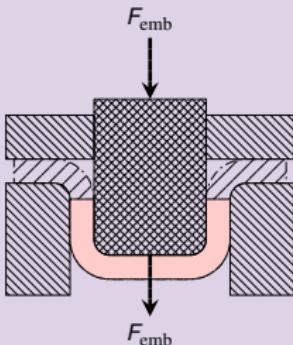
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}} + \frac{\pi}{4}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)\sigma$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



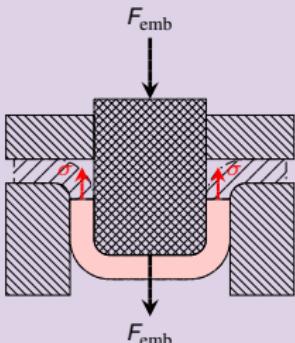
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



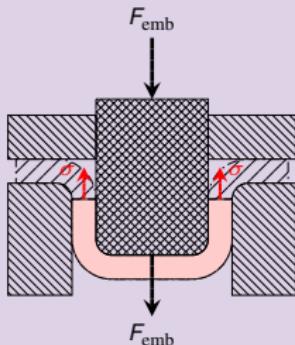
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

$$-F_{\text{emb}} + \frac{\pi}{4}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)\sigma = 0$$

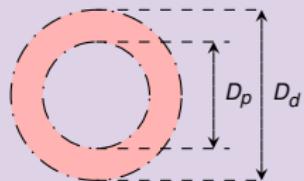
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_{\text{e}}$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



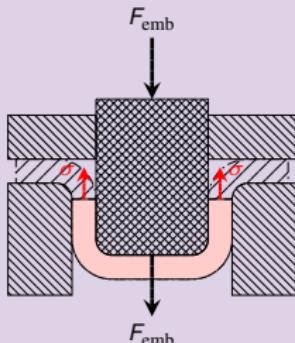
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

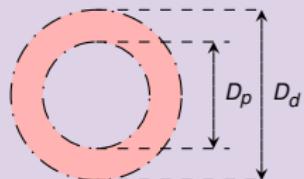
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



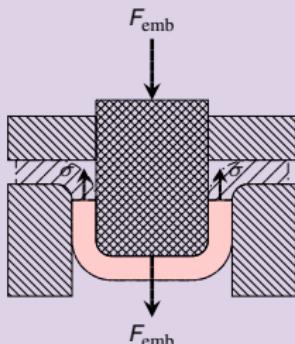
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

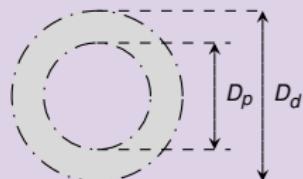
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



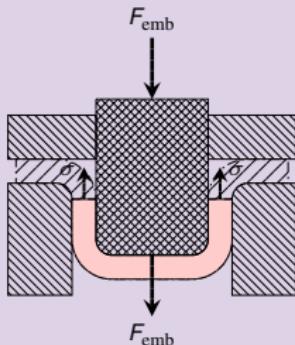
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

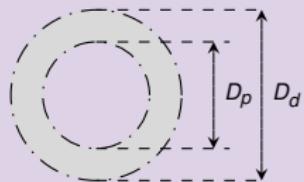
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



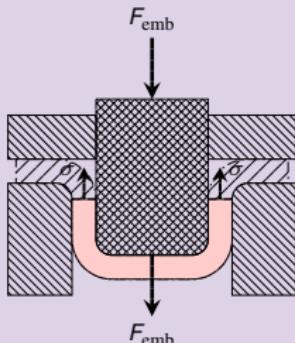
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

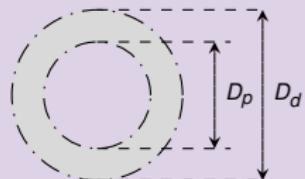
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_c$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



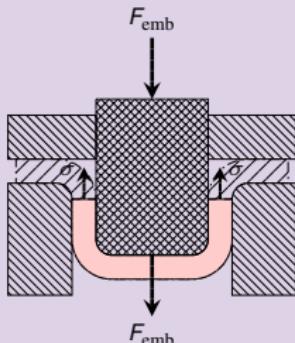
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

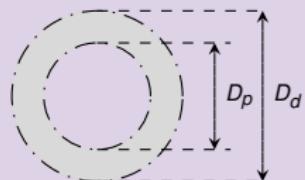
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_e$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



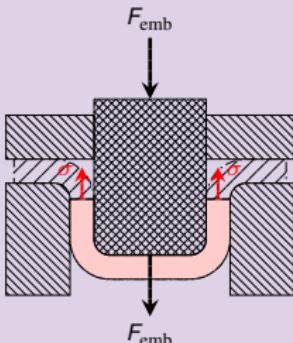
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

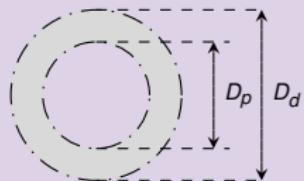
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_e$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



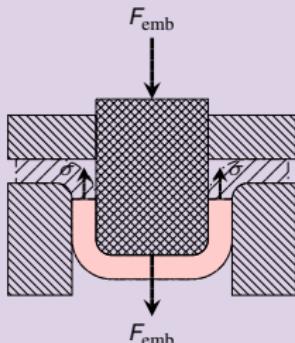
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

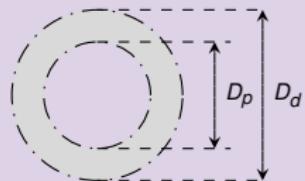
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_{\text{e}} \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}R_{\text{e}}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



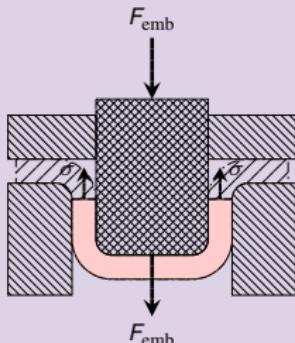
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

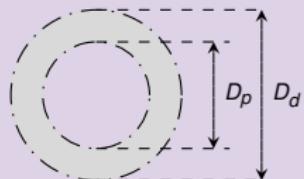
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_{\text{e}} \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}R_{\text{e}}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



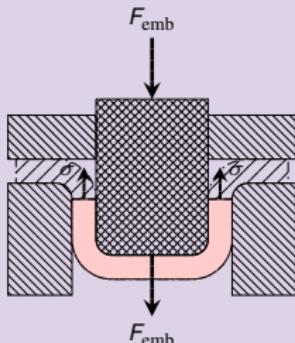
- *Equilibre des forces sur le flan dans la matrice dans la direction axiale*

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

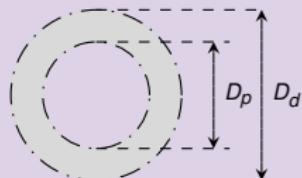
- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_{\text{e}} \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}R_{\text{e}}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)$$

# Calcul de la force d'emboutissage



Pièce emboutie (vue de dessus)



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

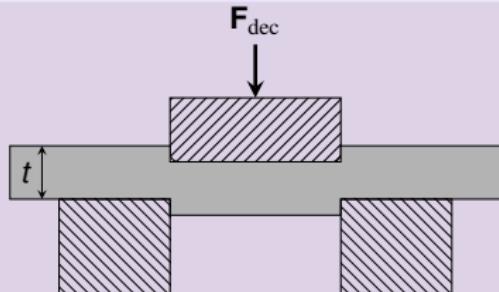
$$-F_{\text{emb}} + \frac{\pi}{4}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)\sigma = 0 \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)\sigma$$

- *Plastification du matériau (grande déformation) :*

$$\sigma \simeq R_{\text{e}} \implies F_{\text{emb}} = \frac{\pi}{4}R_{\text{e}}(D_{\text{d}}^2 - D_{\text{p}}^2)$$

◀ retour

# Calcul de la force de découpage



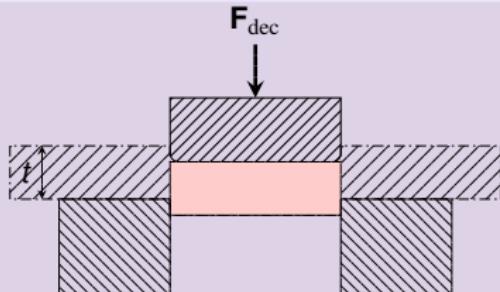
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

$$-F_{dec}$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



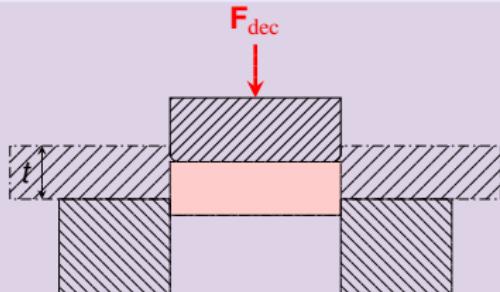
- *Equilibre des forces sur la **découpe** dans la direction axiale*

$$-F_{dec}$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



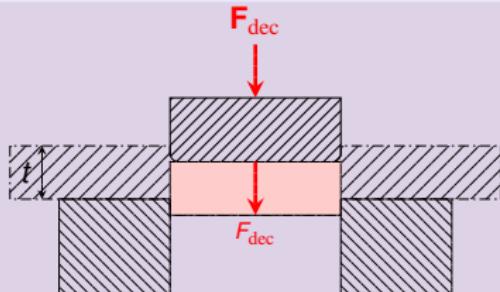
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

$$-F_{dec}$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



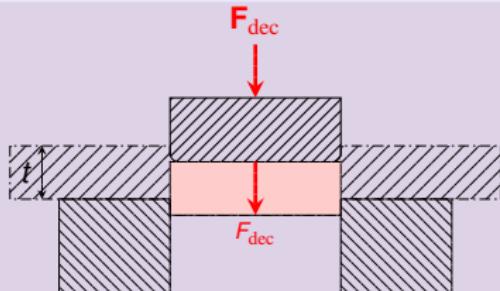
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

$$-F_{dec}$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



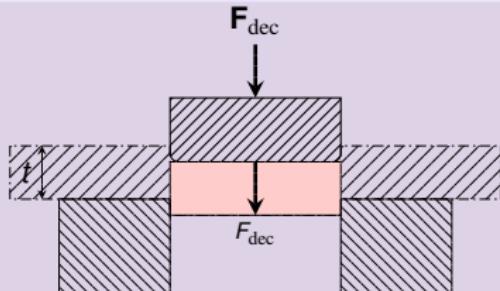
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



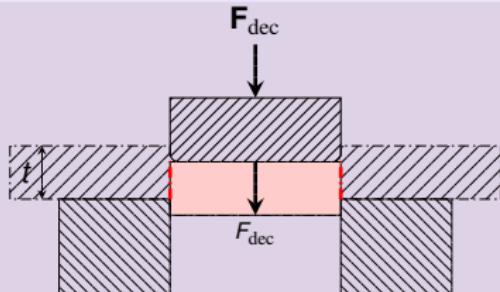
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



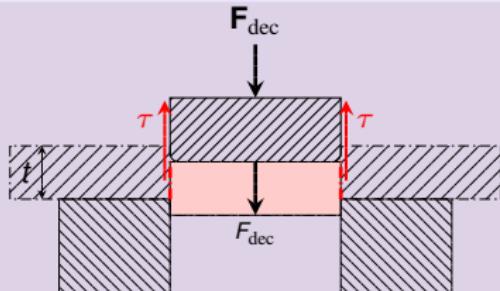
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



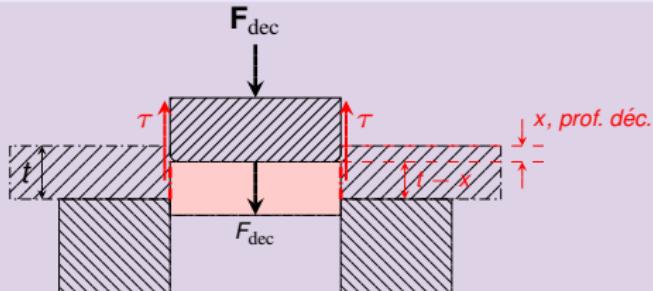
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

$$-F_{\text{dec}} + \tau L(t - x)$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



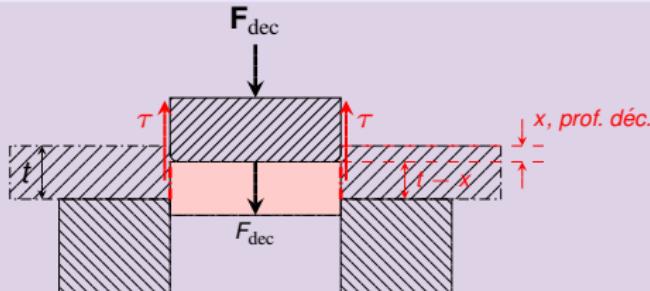
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

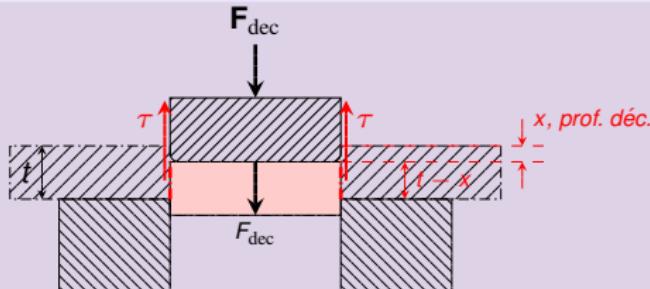
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

$$-F_{\text{dec}} + \tau L(t - x)$$

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

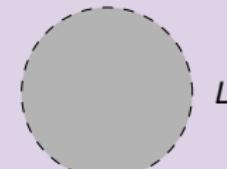
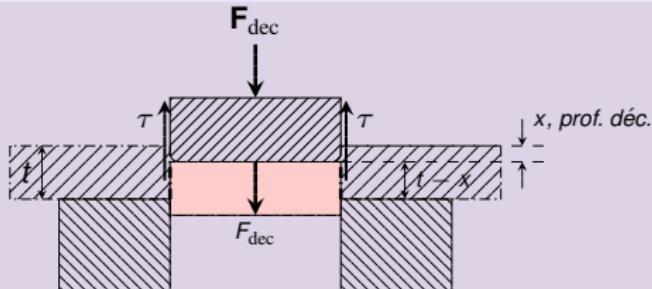
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

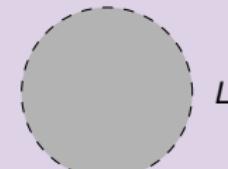
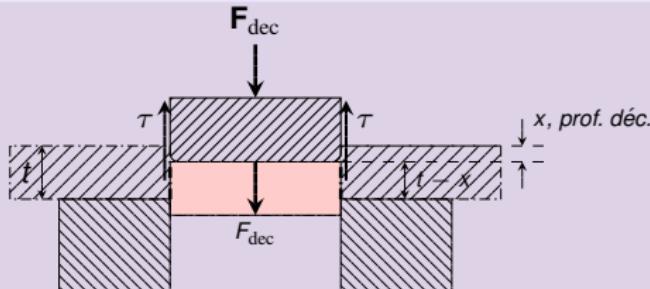
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

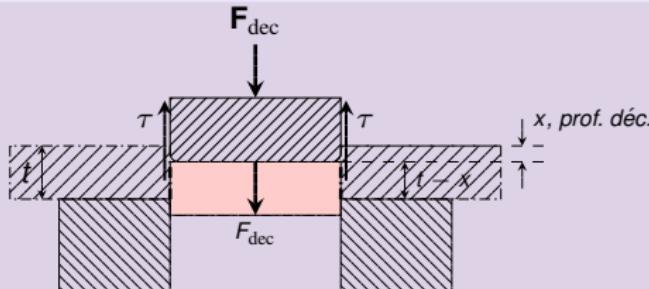
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

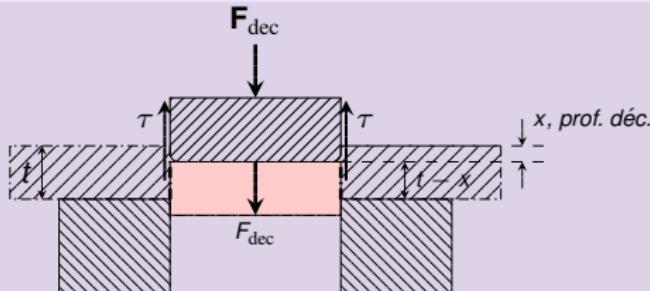
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_S$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

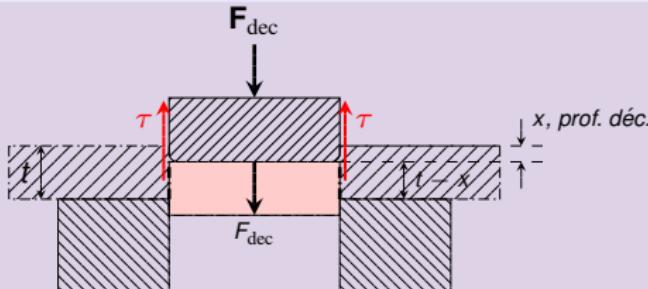
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

$$\tau = \tau_s$$

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

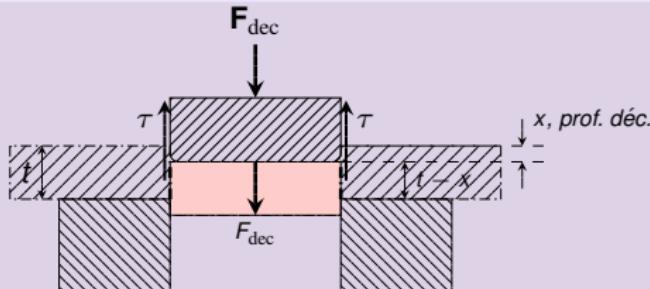
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

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

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

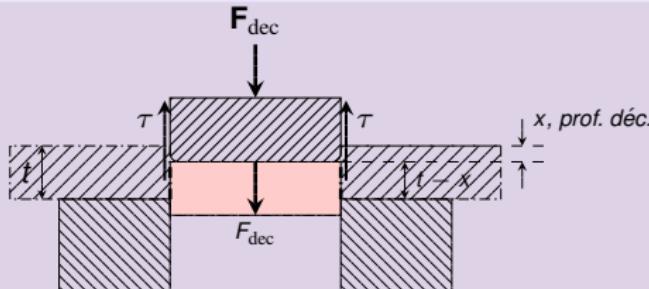
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

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

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

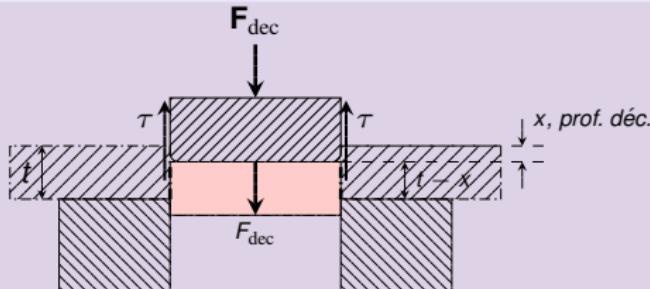
- *Equilibre des forces sur la découpe dans la direction axiale*

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

- *Rupture du matériau :*

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

# Calcul de la force de découpage



Pièce découpée (vue de dessus)

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

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

- *Rupture du matériau :*

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

◀ retour

# 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 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.