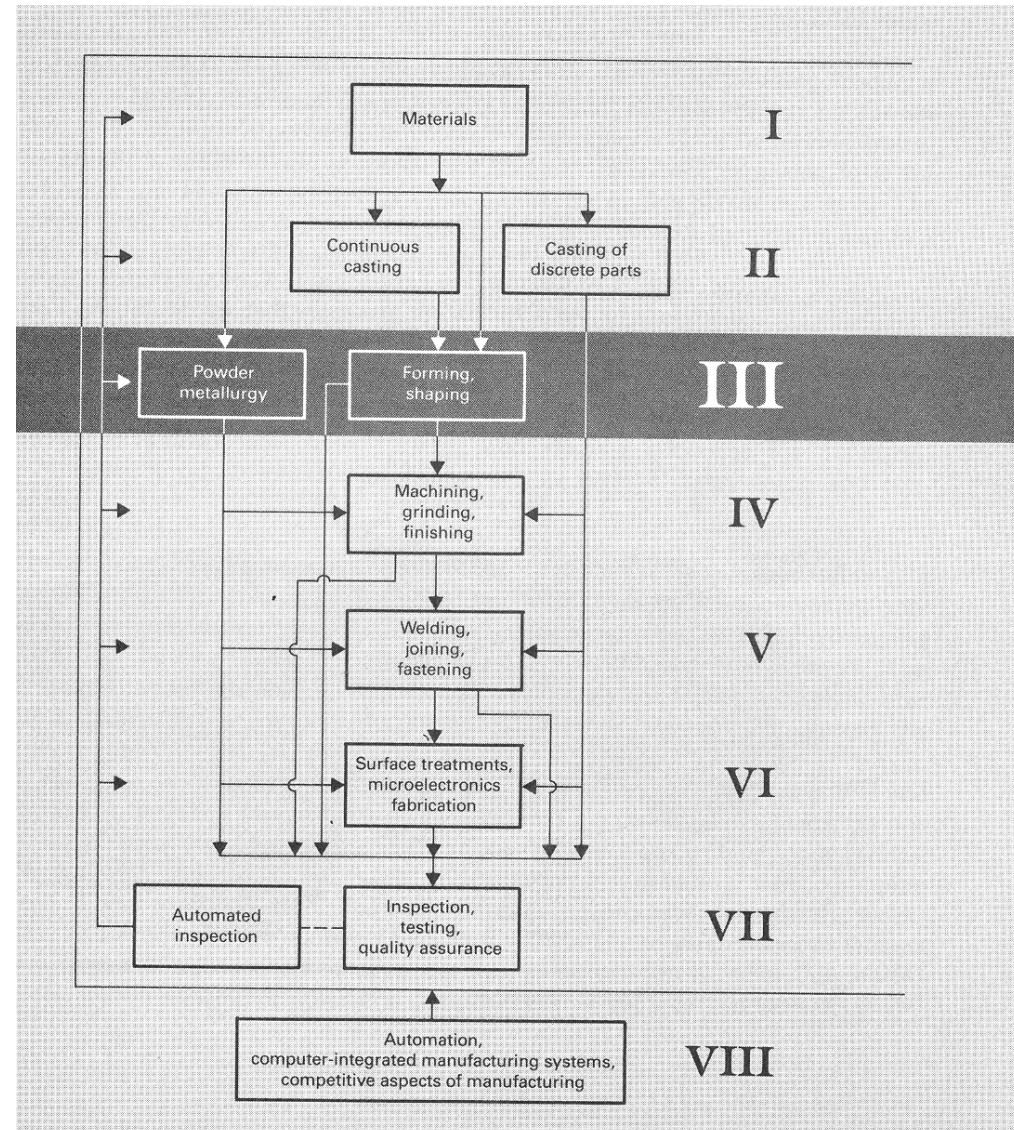


# Partie II : la mise en forme des matériaux



# Plan Mise en forme

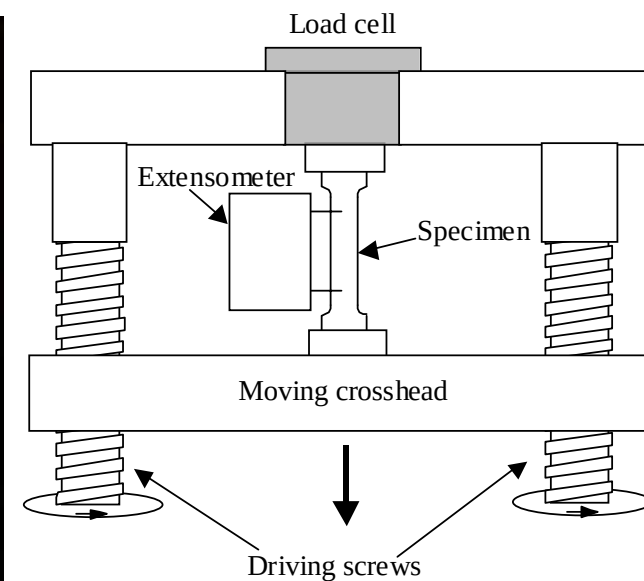
1. La déformation des matériaux métalliques
2. Le laminage
3. Le forgeage
4. L'extrusion
5. L'emboutissage
6. Traitements Thermiques: le recuit

# Quelques définitions préliminaires

- La capacité à soutenir des contraintes sans se déformer élastiquement s'appelle la rigidité.
- La capacité à soutenir des contraintes élevées sans se déformer plastiquement ou pour se déformer jusqu'à un certain niveau s'appelle la résistance. La résistance est directement liée à la dureté du matériau.
- La capacité à se déformer élastiquement à moindre effort s'appelle la compliance.
- La capacité à se déformer plastiquement et sans que la déformation ne se localise s'appelle la déformabilité (avec aussi la notion d'un faible effort associé à une grande déformation plastique) ou ductilité (peu importe alors le niveau de contrainte)

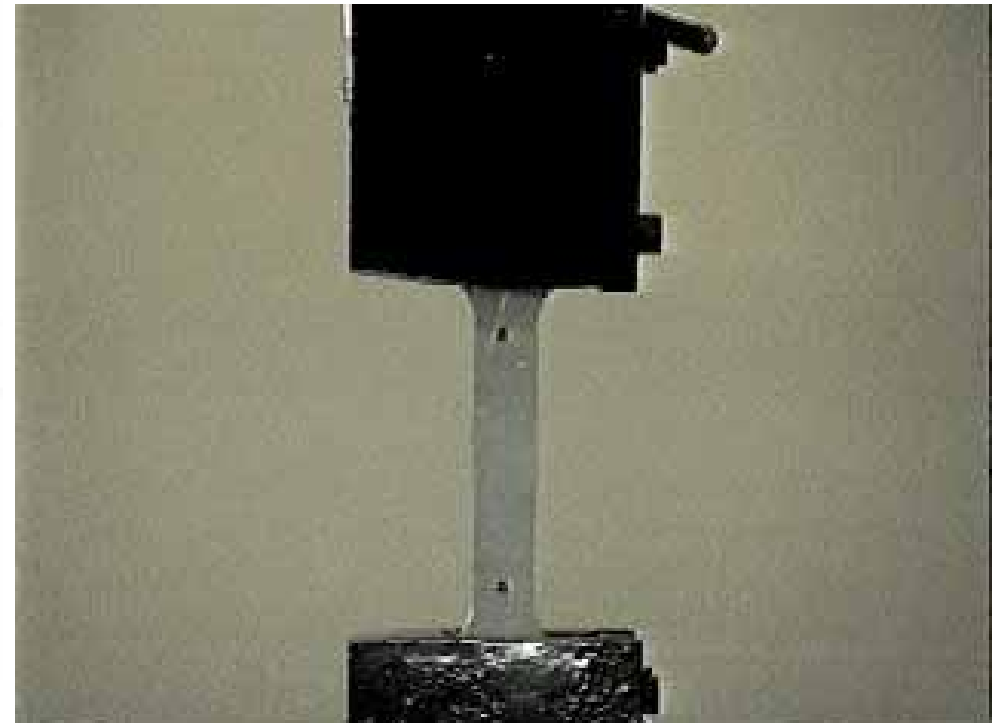
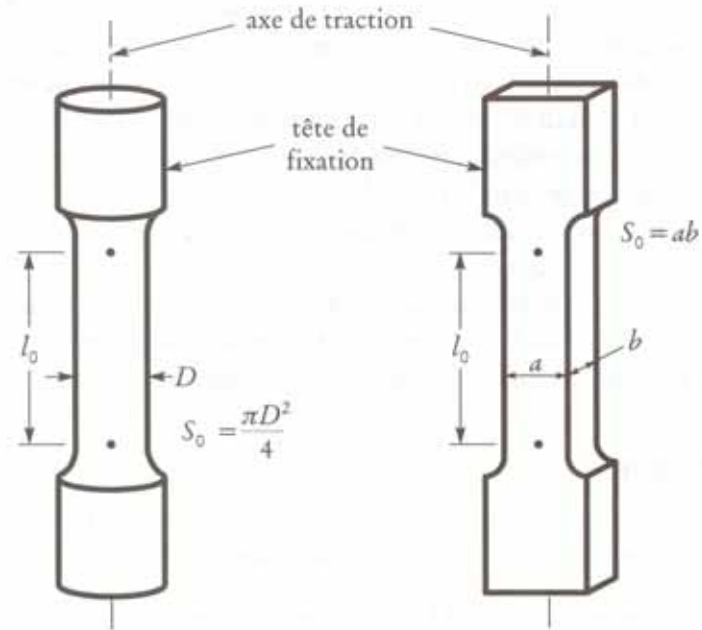
# Le test de traction simple

- D'un point de vue ingénierie, la déformation en traction simple est le test expérimental le plus courant pour décrire la réponse d'un matériau à un effort mécanique.
- Le but est de mesurer la force imposée et l'allongement correspondant afin de pouvoir quantifier la rigidité (ou bien l'inverse, la compliance), la résistance et la déformabilité du matériau.

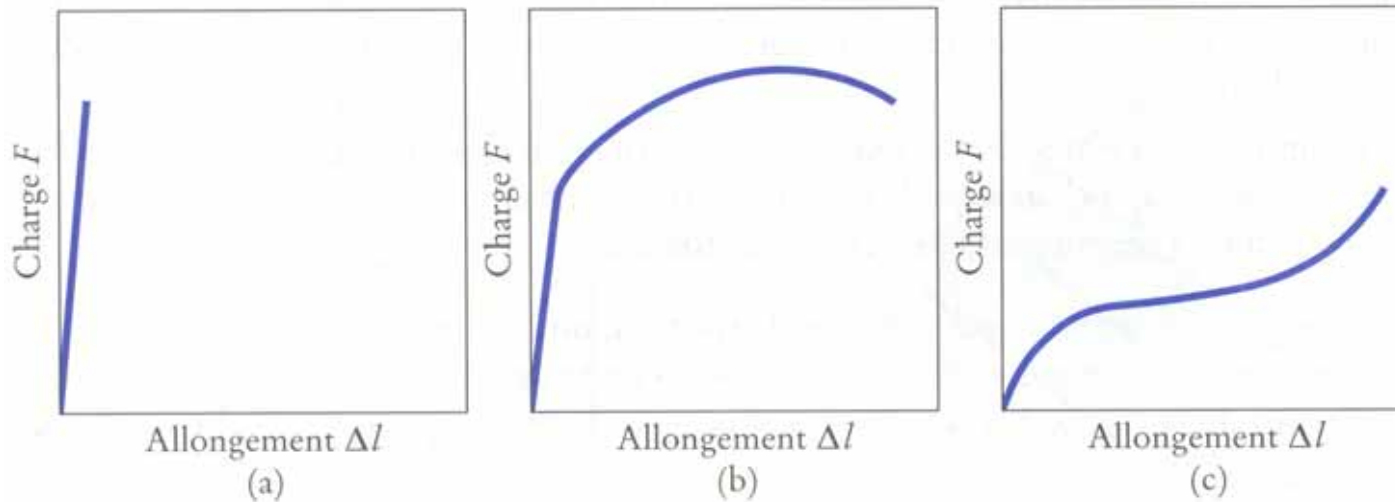




# Le test de traction simple: le film



# Courbes force/déplacement



- (a) Typique des matériaux fragiles tels les céramiques ou les verres
- (b) Typique des matériaux ductiles tels les métaux (Cu, Fe, ...)
- (c) Typique d'un polymère thermoplastique ou d'un élastomère

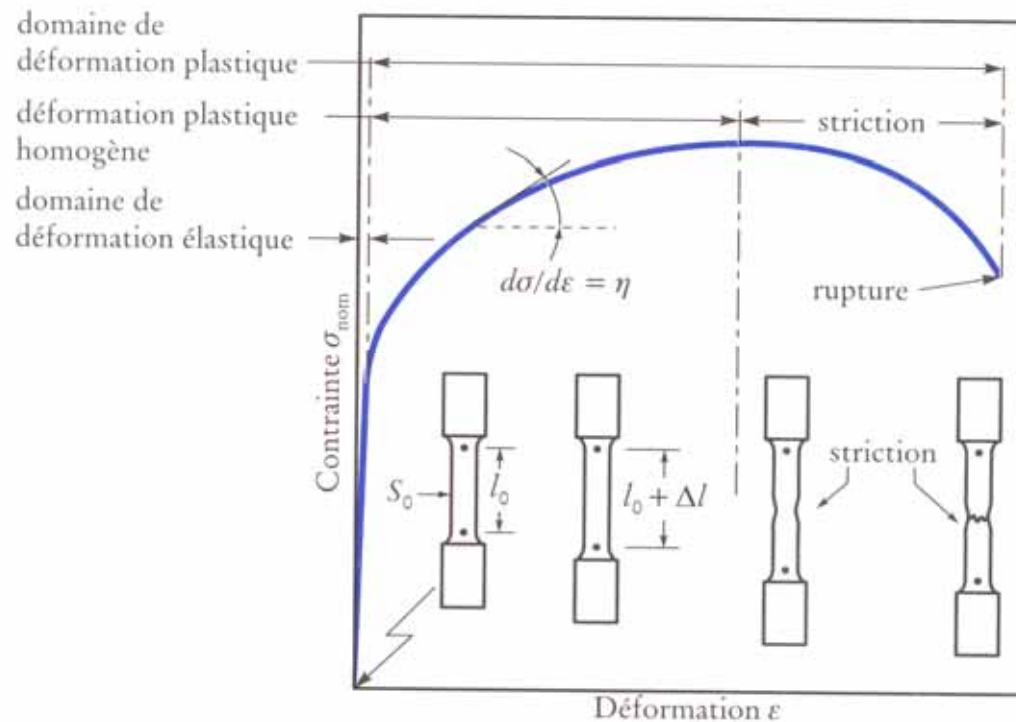
Dans un premier temps, nous allons nous focaliser sur le comportement ductile.

# Contrainte et déformation nominales

Considérons une déformation en traction simple, à vitesse de déplacement imposée, d'une éprouvette de section uniforme  $A_0$  sur laquelle on repère une longueur de référence, dite longueur de jauge,  $l_0$ . Les **contrainte et déformation nominales** (ou « d'ingénieur ») sont définies par:

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0}$$

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0}$$



# Déformation élastique

Dans le domaine élastique, la contrainte et la déformation sont liées par la loi de Hooke:

$$\sigma_n = E \varepsilon_n \quad E = \text{module de Young}$$

Le module de Young s'exprime en général en GPa ( $10^9$  Pa). Le module élastique quantifie la **propriété de rigidité**.

Pendant que l'éprouvette s'allonge dans la direction de traction, elle se contracte dans les directions transverses

$$\varepsilon_{\text{transverse}} = -\nu \varepsilon$$

avec  $\nu$  appelé le coefficient de Poisson. La valeur typique du coefficient de Poisson varie entre 0.3 et 0.45.

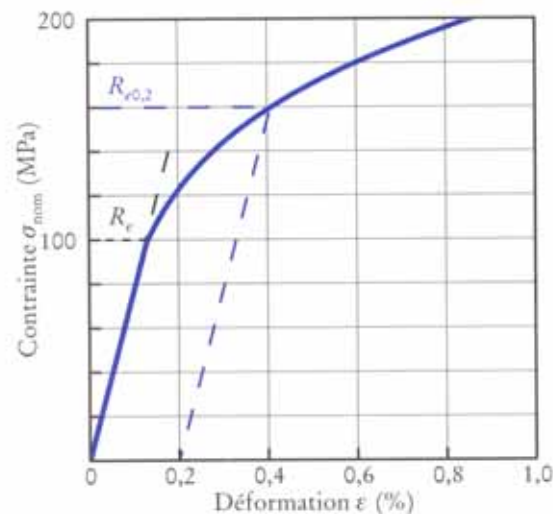
Un matériau qui aurait un coefficient de Poisson de 0.5 sera incompressible au niveau de la déformation élastique. En effet, une contraction dans les deux directions transverses de 50% de l'allongement dans la direction de traction conserve le volume de matière.

# Déformation élastique

La limite à laquelle la déformation du matériau cesse d'être entièrement élastique est notée  $\sigma_0$  et est appelée limite d'élasticité ou limite d'écoulement plastique (un autre symbole très utilisé dans le milieu francophone est  $R_e$ ).

Cette contrainte quantifie la **propriété de résistance** du matériau à entrer en plasticité, c'est-à-dire sa capacité à rester élastique quand il est soumis à un effort et à ne pas se déformer de façon permanente.

La plupart des structures et objets métalliques de la vie de tous les jours sont conçus pour rester élastiques!

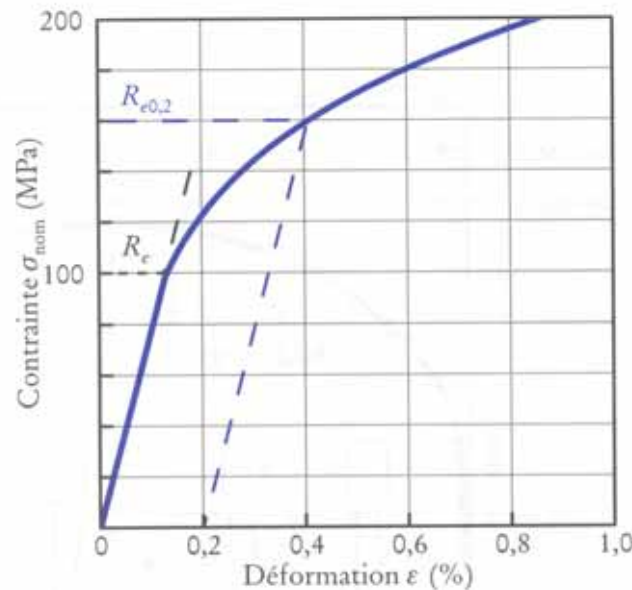


# Déformation élastique

Dans bon nombre de cas, il est difficile de détecter avec exactitude le moment de l'entrée en plasticité.

➡ Limite d'élasticité conventionnelle  $\sigma_Y$  (ou  $\sigma_{0.2\%}$  ou  $R_{e0.2}$ )

elle est obtenue en traçant à l'abscisse  $\varepsilon = 0.2\%$  une droite de pente égale à  $E$  comme l'intersection de cette droite avec la courbe de traction.



# Déformation élastique

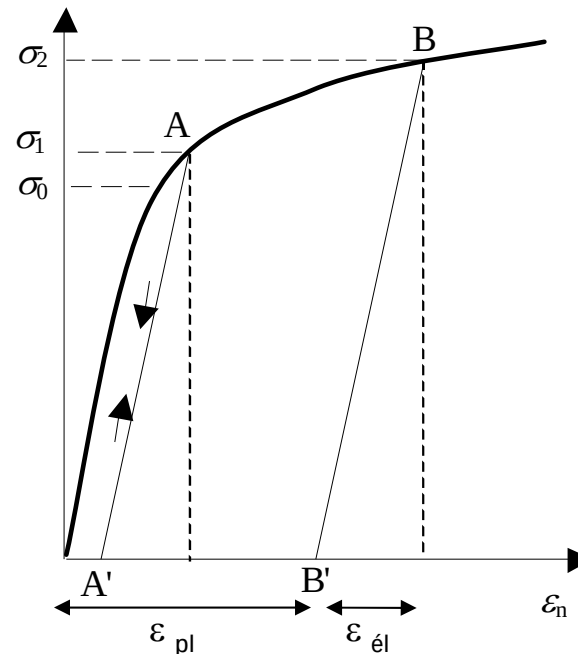
|                                                 | $E$ (GPa) | $\nu$ | $\alpha (10^{-6} \text{K}^{-1})$ |
|-------------------------------------------------|-----------|-------|----------------------------------|
| <u>Ceramics and glasses</u>                     |           |       |                                  |
| Diamond                                         | $\pm 965$ |       | $\pm 1$                          |
| Silicon carbide, SiC                            | $\pm 470$ |       | 4.3                              |
| Silicon nitride, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 310       |       | 3.3                              |
| Alumina, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | $\pm 415$ | 0.23  | 8.1                              |
| Zirconia, ZrO <sub>2</sub>                      | 170       |       | 9.8                              |
| Silica glass                                    | $\pm 70$  | 0.27  | 0.4                              |
| <u>Metals</u>                                   |           |       |                                  |
| Aluminium                                       | 69 - 72   | 0.34  | 24                               |
| Copper                                          | 129       | 0.34  | 17                               |
| Iron                                            | 210       | 0.29  | 12                               |
| Steels                                          | 200 - 210 |       | 12 - 17                          |
| Nickel                                          | 199       | 0.31  | 13                               |
| Titanium                                        | 116       | 0.32  | 8.5                              |
| Lead                                            | 16        | 0.43  | 29                               |
| <u>Polymers</u>                                 |           |       |                                  |
| Polycarbonate                                   | 2.4       |       | 66                               |
| Polyethylene<br>(high density)                  | 0.4 - 1.3 | 0.40  | 110 - 130                        |
| Polystyrene                                     | 2.5 - 3   | 0.33  | 60 - 80                          |
| Polypropylene                                   | 1.1 - 1.6 |       | 58 - 100                         |



# Déformation plastique et écrouissage

Dans la plupart des matériaux, la contrainte continue à augmenter une fois la limite d'élasticité initiale dépassée.

Si le matériau est déchargé, puis rechargé, il va en général retourner sur la courbe initiale. En d'autres mots, la limite d'élasticité du matériau augmente à mesure que la déformation plastique se déroule. On appelle cela le « phénomène d'écrouissage » ou encore « phénomène de consolidation ». Afin d'éviter la localisation de la déformation, il est nécessaire que l'augmentation de la force avec la déformation due à l'écrouissage soit supérieure à la diminution de la force causée par la réduction de section



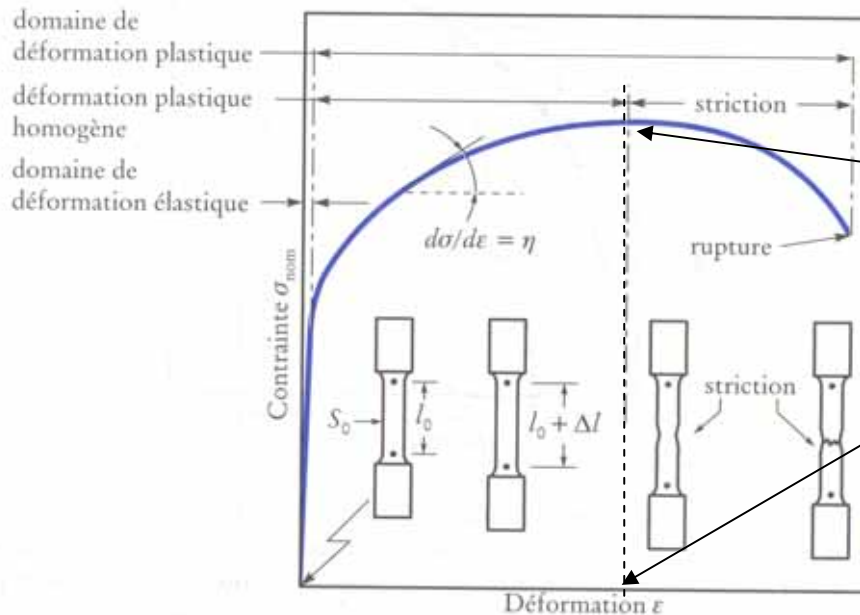
$$\epsilon = \epsilon_{pl} + \epsilon_{el}$$

# Striction, résistance à la traction

A un certain moment, l'effet de la réduction de section prend le dessus sur l'écrouissage. A ce moment, la capacité de l'échantillon à supporter une charge atteint son maximum et la déformation se localise:

$$\frac{d\sigma_n}{d\varepsilon_n} = 0$$

Critère de striction en traction



Résistance à la traction  $R_m$ :  
contrainte nominale max.

Elongation uniforme  $\varepsilon_u$ :  
déformation associée à  $R_m$

# De la striction à la rupture

Après l'apparition de la striction, la charge diminue jusqu'à ce que la fissuration se produise.

Au sein de la zone de striction les contraintes (vraies) continuent à augmenter. C'est juste la force (globale) qui diminue dû à la réduction de section.

Le reste de l'éprouvette se décharge élastiquement et se contracte donc légèrement (ceci explique la rupture brutale des cordes de guitare).

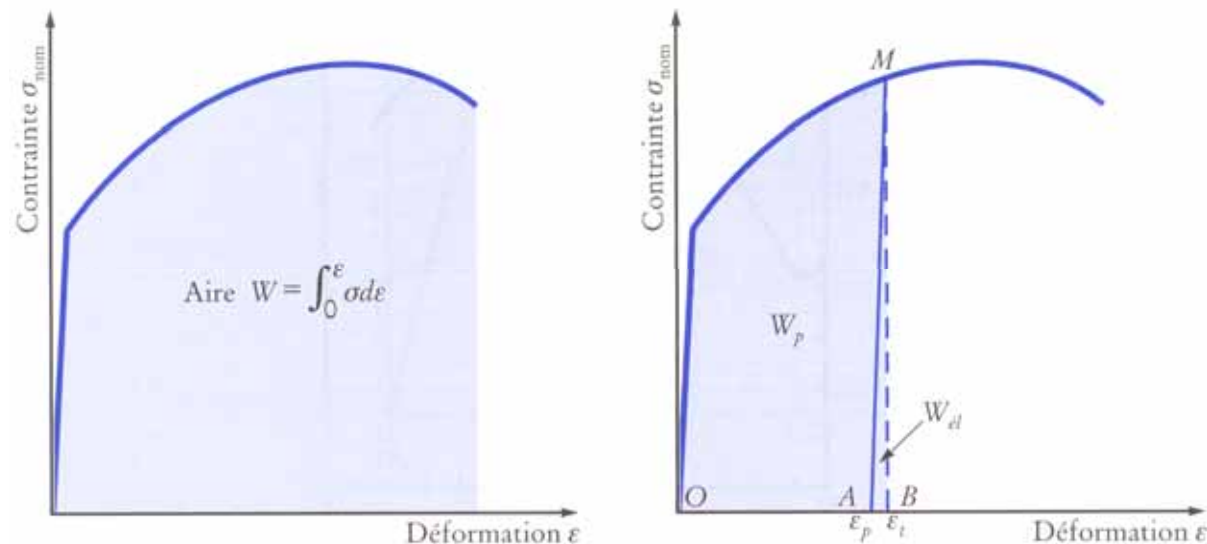
Au sein de la zone de striction, se développent des processus d'endommagement qui mènent à la rupture.

La réduction d'aire  $Z$  est un paramètre qui quantifie **la propriété de résistance à l'endommagement et la rupture**, en traction simple (sa valeur dépend fortement du type de chargement appliqué).

$$Z = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

# Energie de déformation

L'aire sous la courbe contrainte déformation représente le *travail par unité de volume nécessaire pour déformer et rompre le matériau*. Ce travail se corrèle assez bien avec la capacité qu'à le matériau à absorber de l'énergie avant de rompre. Cette capacité est liée à la notion de ténacité qui sera abordée plus tard. Pour être tenace un matériau doit être résistant (capable de supporter de grandes contraintes) et ductile (capable de supporter de grandes déformations plastiques).



# Energie de déformation

Mathématiquement, on écrit:

$$W = \int_0^{\varepsilon_{rupture}} \sigma d\varepsilon = \int_{l_{initial}}^{l_{final}} \frac{F}{S} \frac{dl}{l} = \frac{1}{V} \int_{l_{initial}}^{l_{final}} F dl$$

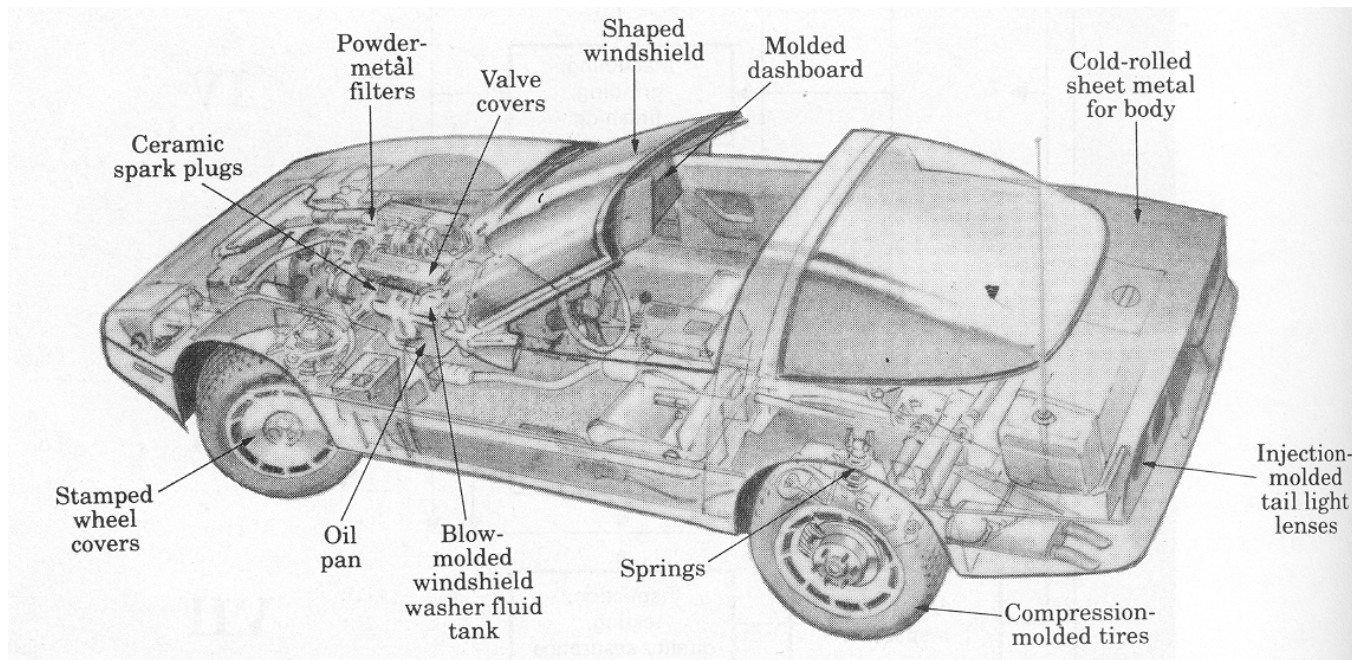
Travail nécessaire à déformer et rompre l'échantillon

Ce travail se décompose en une énergie plastique et élastique.

L'énergie élastique s'écrit:

$$W_{el} = \int \sigma d\varepsilon_{el} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_{el} = \frac{E \varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}$$

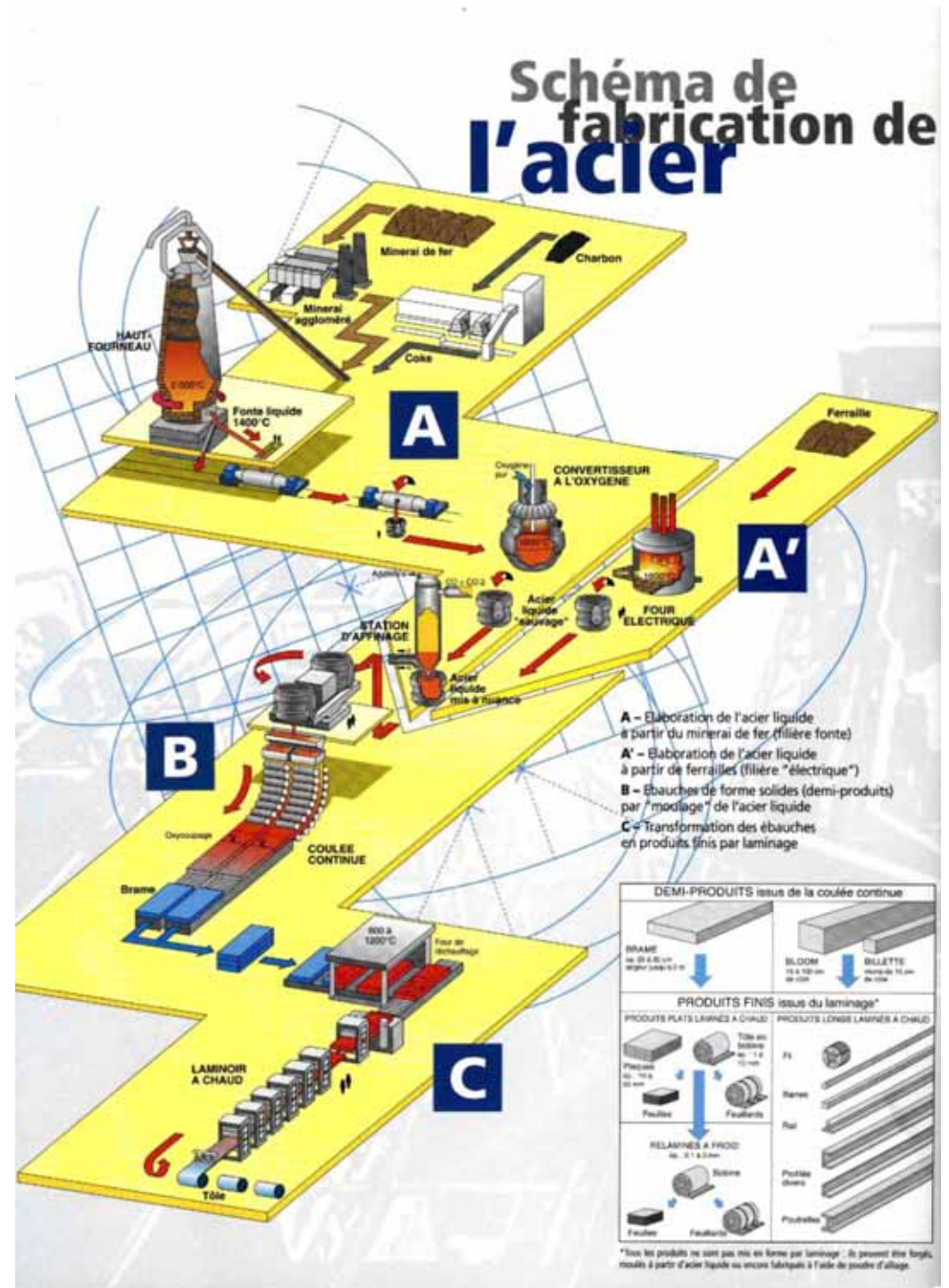
Si un acier ( $E=210\text{GPa}$ ) est déchargé après avoir atteint une contrainte de  $1000\text{ MPa}$ , il recouvre une déformation élastique de  $1000/210000=0.0048=0.48\%$ . Cela correspond à une énergie de  $1000000/420000=2.38\text{ J/m}^3$

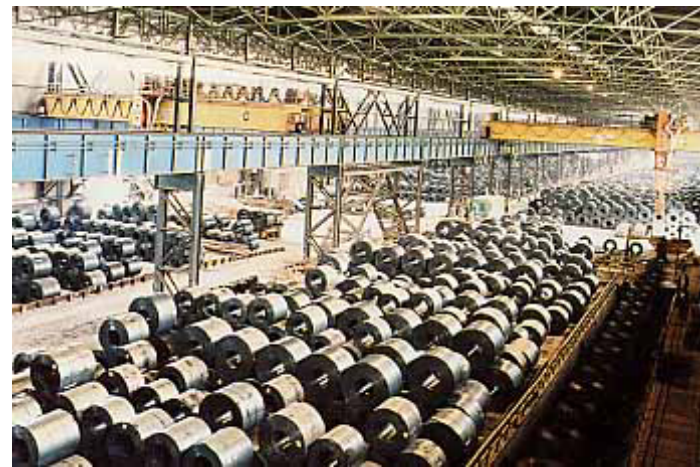
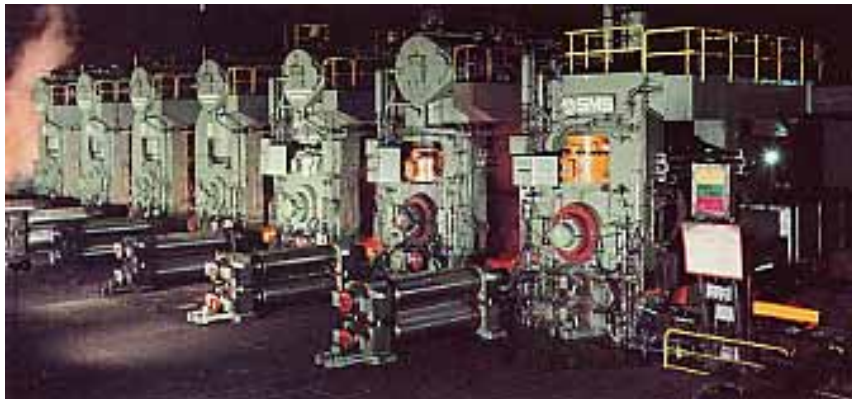


- le laminage (*rolling*),
- le forgeage (*forging*),
- l'extrusion (*extrusion*),
- l'étirage (*drawing*),
- le travail de la tôle (*sheet-forming*),
- la métallurgie des poudres (*powder metallurgy*),
- la mise en forme des plastiques, des matériaux composites et des céramiques



# Le laminage







Le laminage est une opération de forge continue

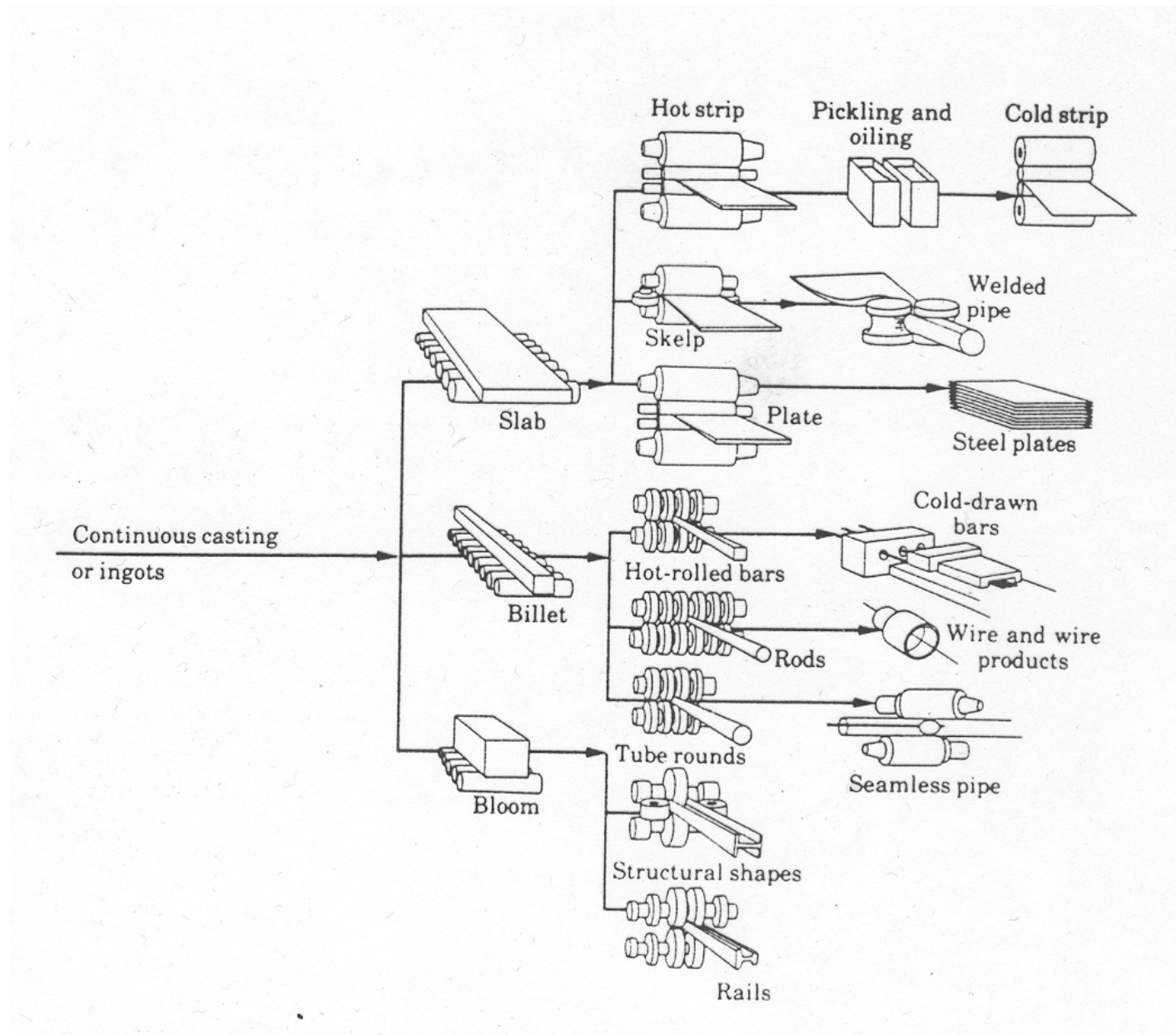
On distingue :

- le laminage longitudinal ou parallèle
- le laminage circulaire
- le laminage hélicoïdal

Les cylindres sont soit lisses (laminage plan), soit cannelés (laminage de mise en forme).

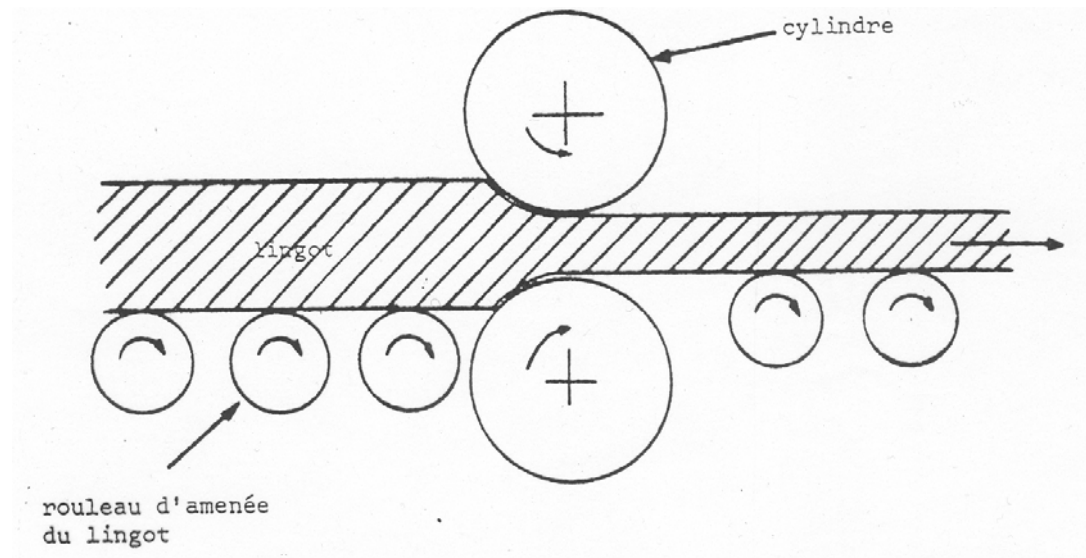
Par ce procédé, on obtient :

- des tôles :
  - fines  $\leq 2$  mm
  - moyennes  $2 < e \leq 10$  mm
  - $e > 10$  mm
- des aciers et certains non-ferreux : ronds, carrés, hexagones.
- des profilés en aciers et non-ferreux :
  - cornières,
  - tés,
  - poutrelles,...
  - des fils et des rails.

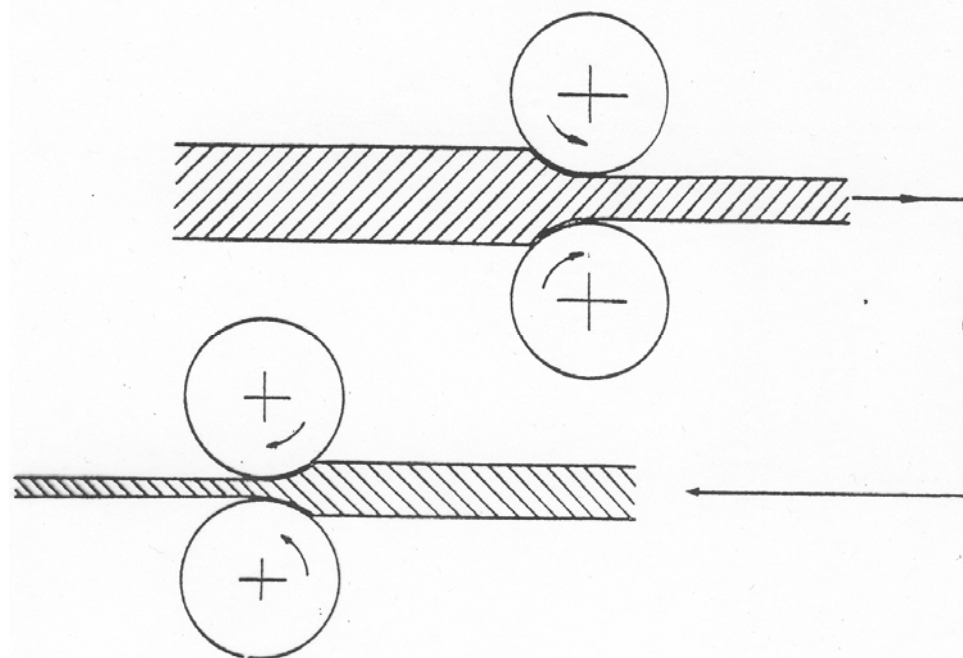
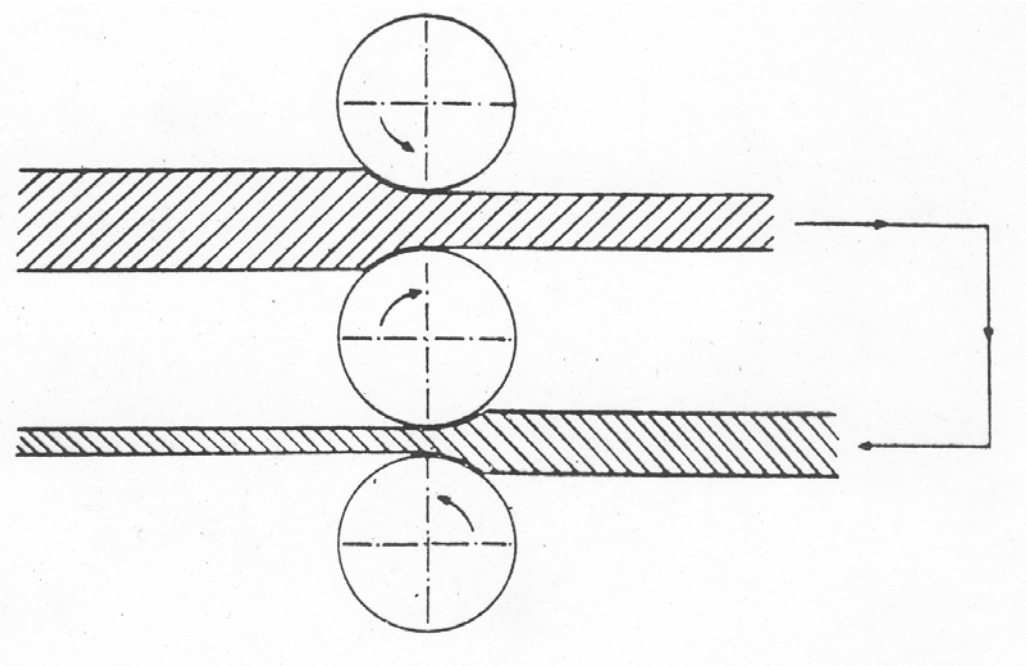


- Les matériaux sont généralement préchauffés aux températures suivantes:
  - 450 °C pour les alliages d'aluminium
  - jusque 1250 °C pour les aciers et leurs alliages
  - jusque 1650 °C pour les alliages réfractaires
- Lingot de section rectangulaire :
  - brame : largeur de 200 à 500 mm  
épaisseur de 40 à 150 mm
  - larget : section inférieure à 200 x 40
- La largeur des produits laminés peut atteindre 5 m et leur épaisseur 0.0025 mm, la vitesse de laminage peut s'élever jusqu'à 25 m/s.

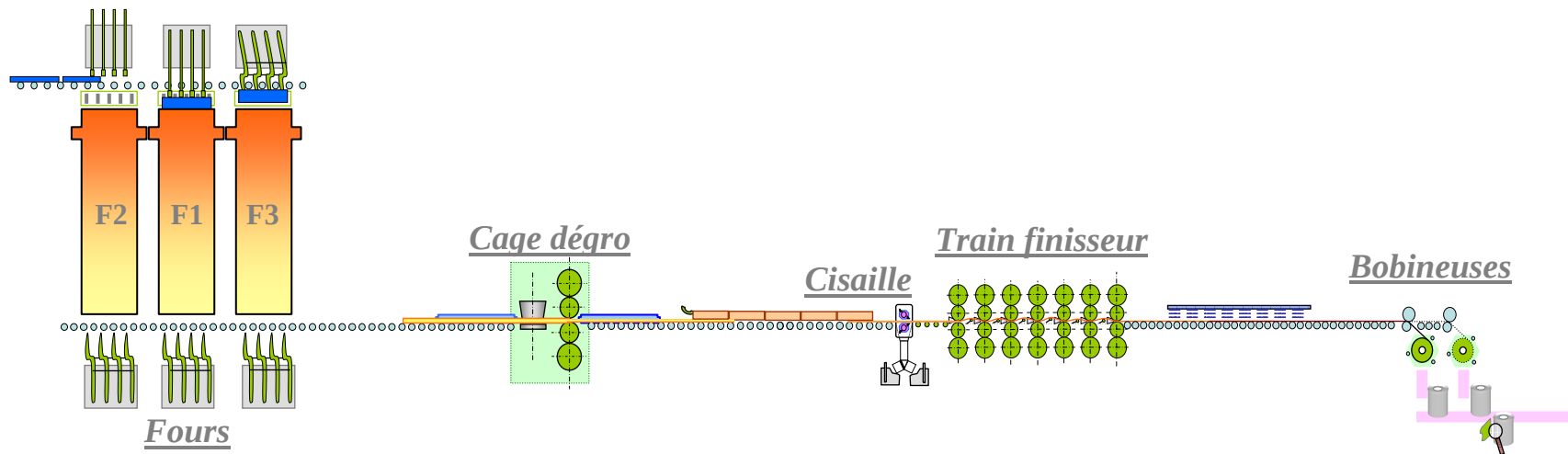
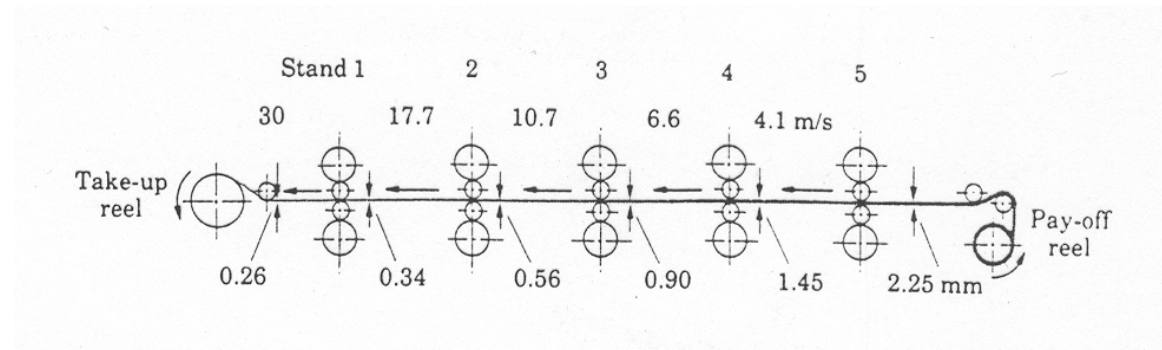
L'opération de laminage doit être rapide, car le métal se refroidit. Cela nécessite alors de grandes puissances, jusqu'à plusieurs milliers de kilowatts.

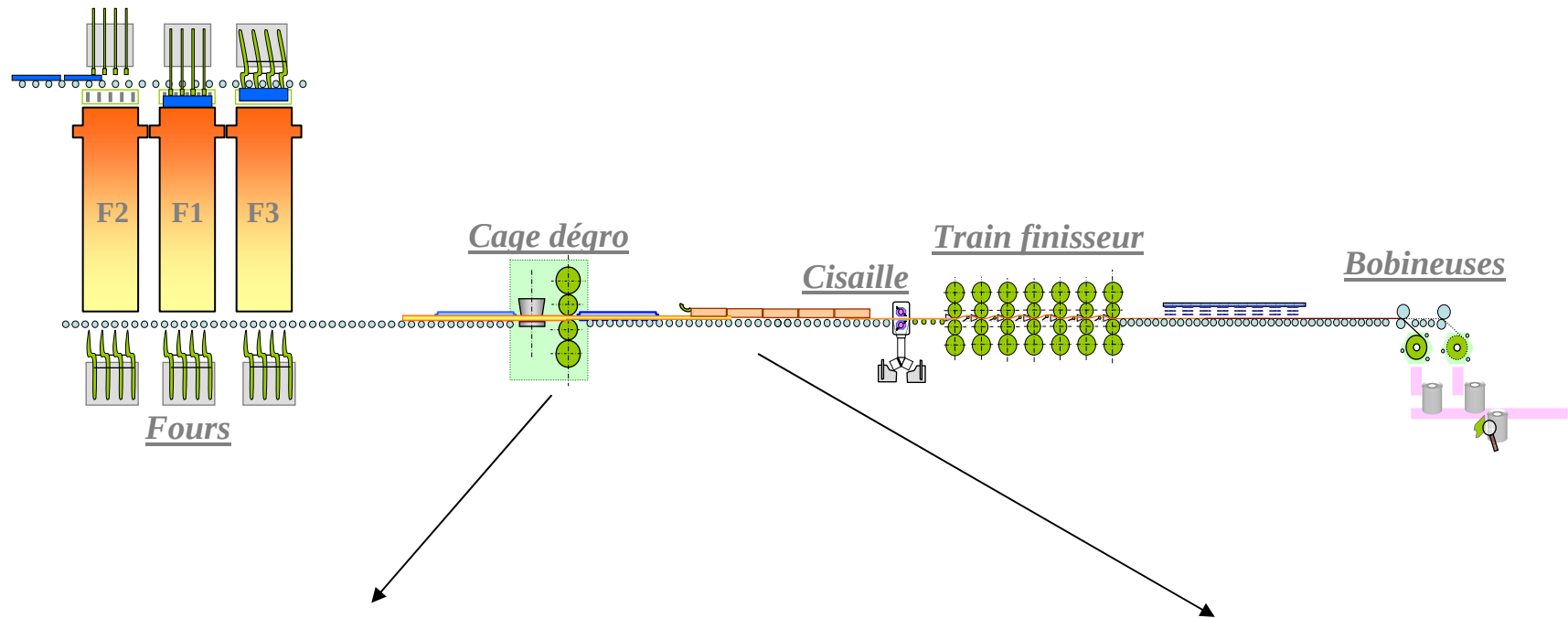


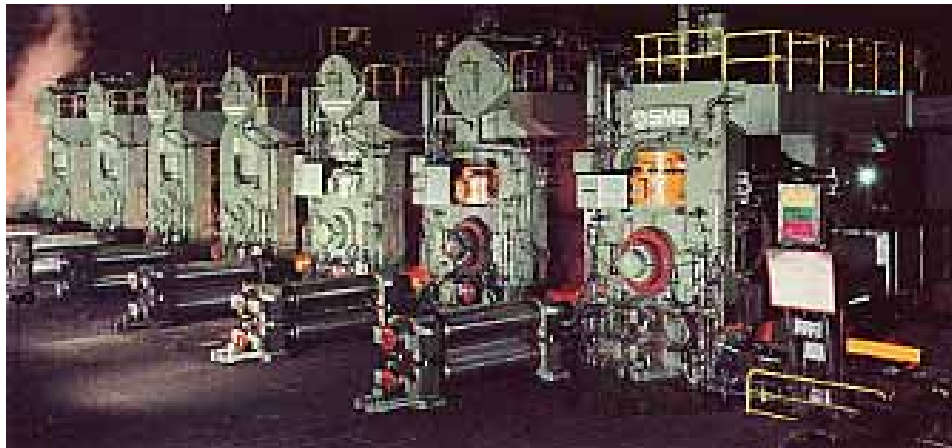
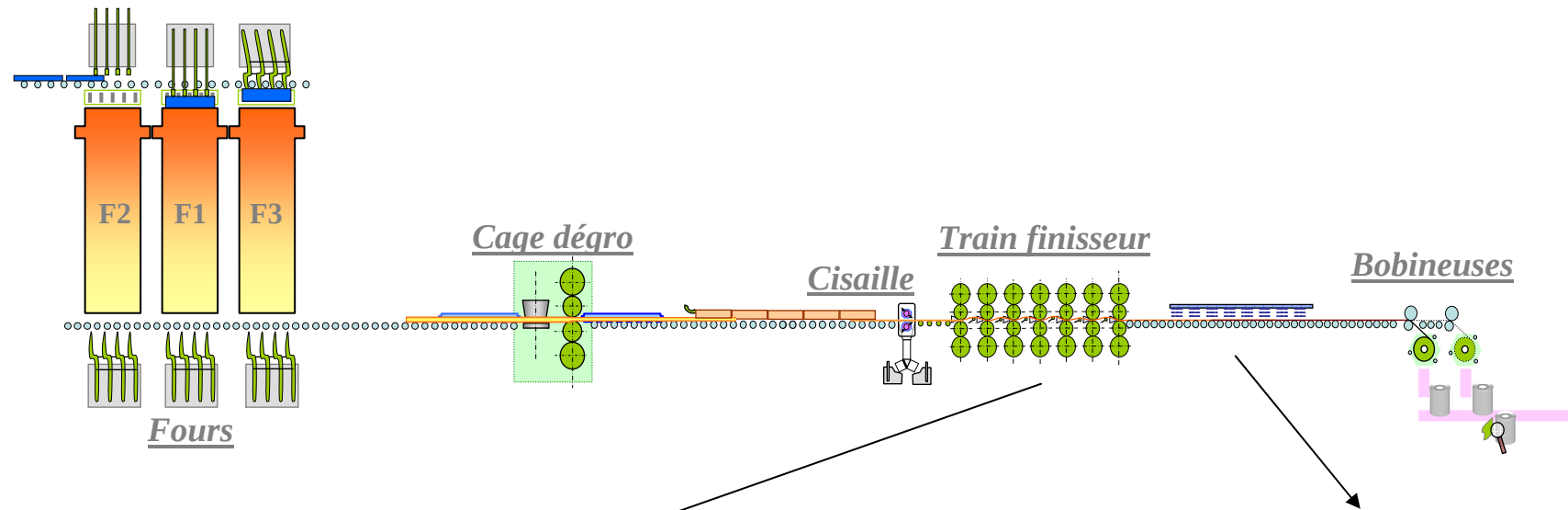
- Plusieurs duos en série.
- Faire repasser le lingot plusieurs fois dans le même laminoir.
  - Le duo réversible
  - Le trio
  - Le double duo

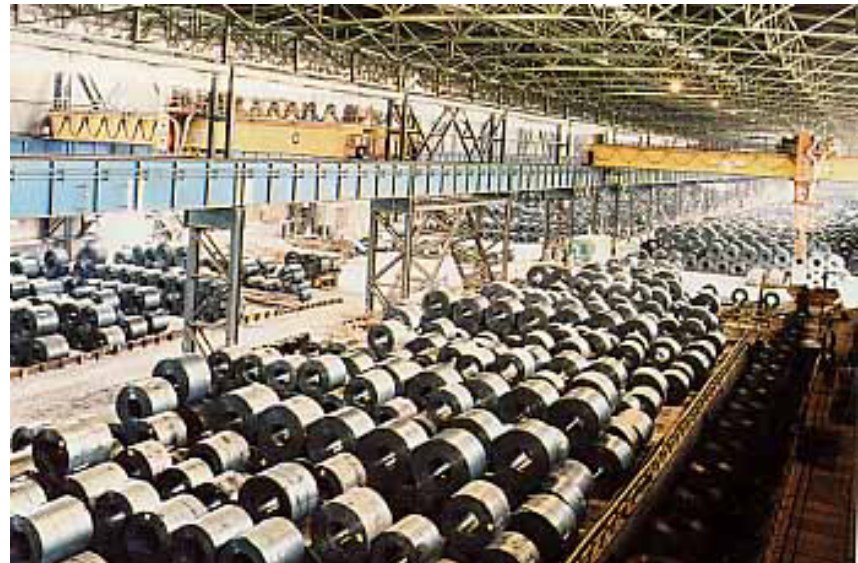
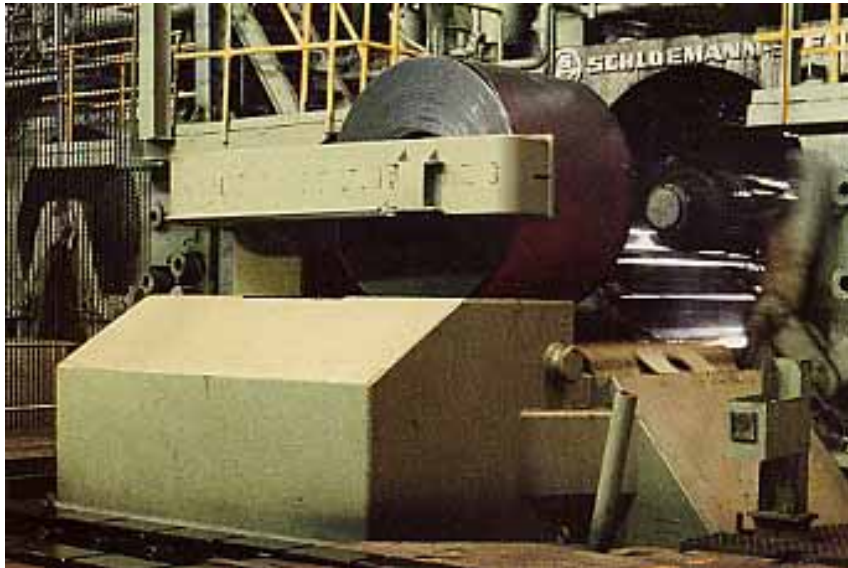
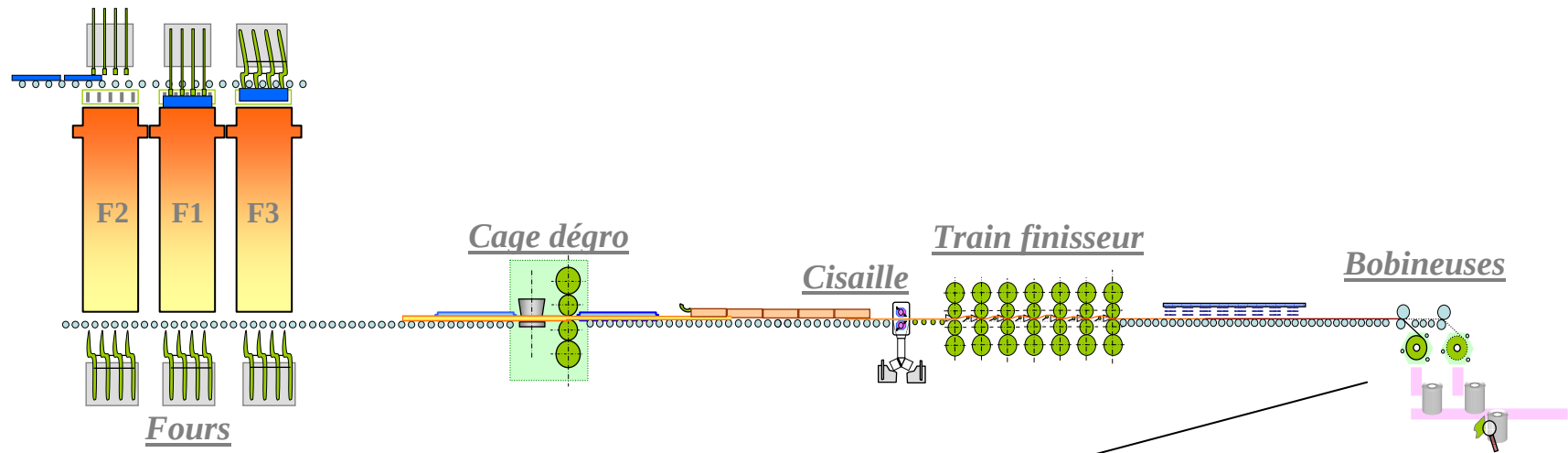






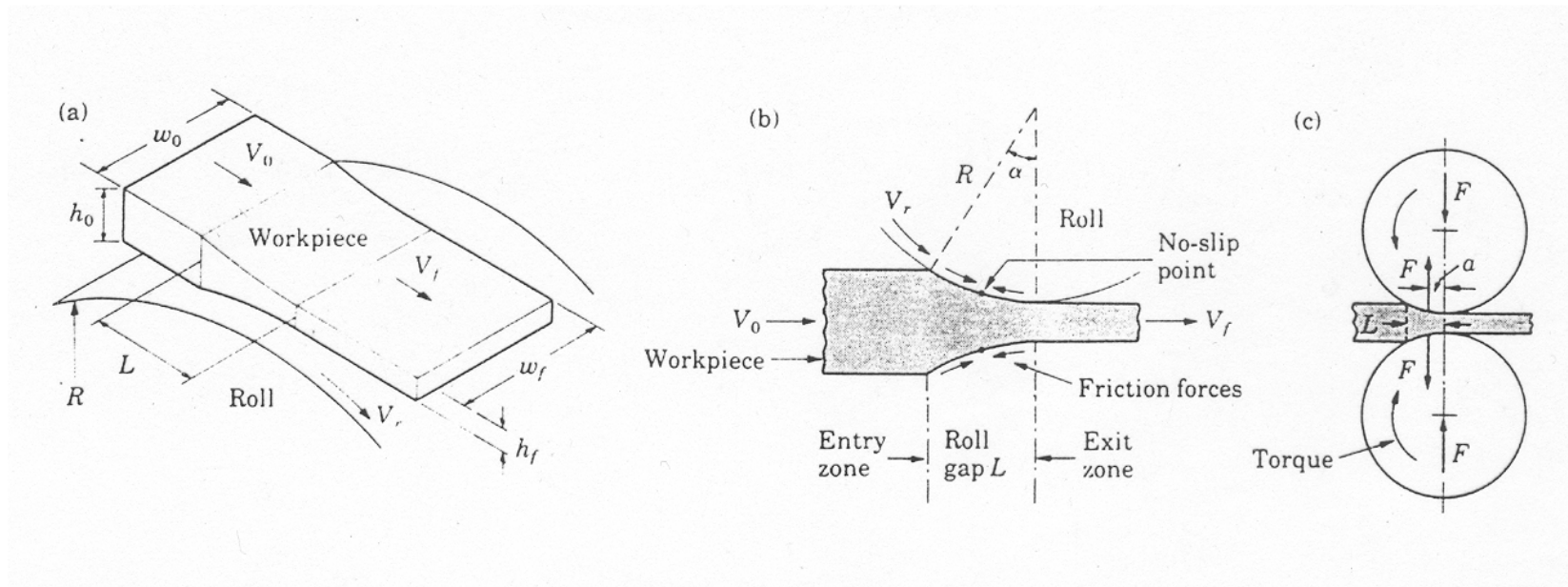




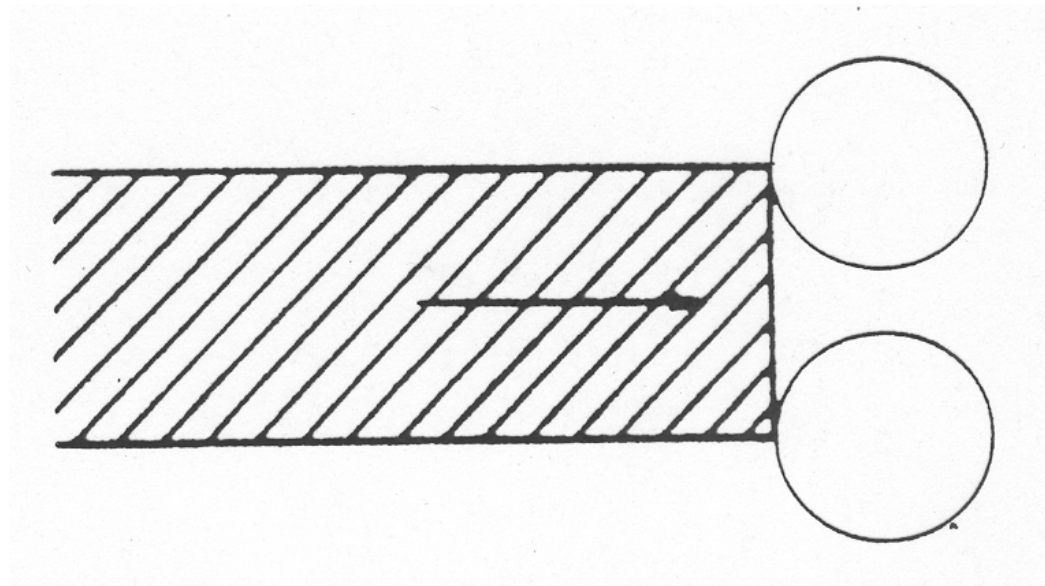




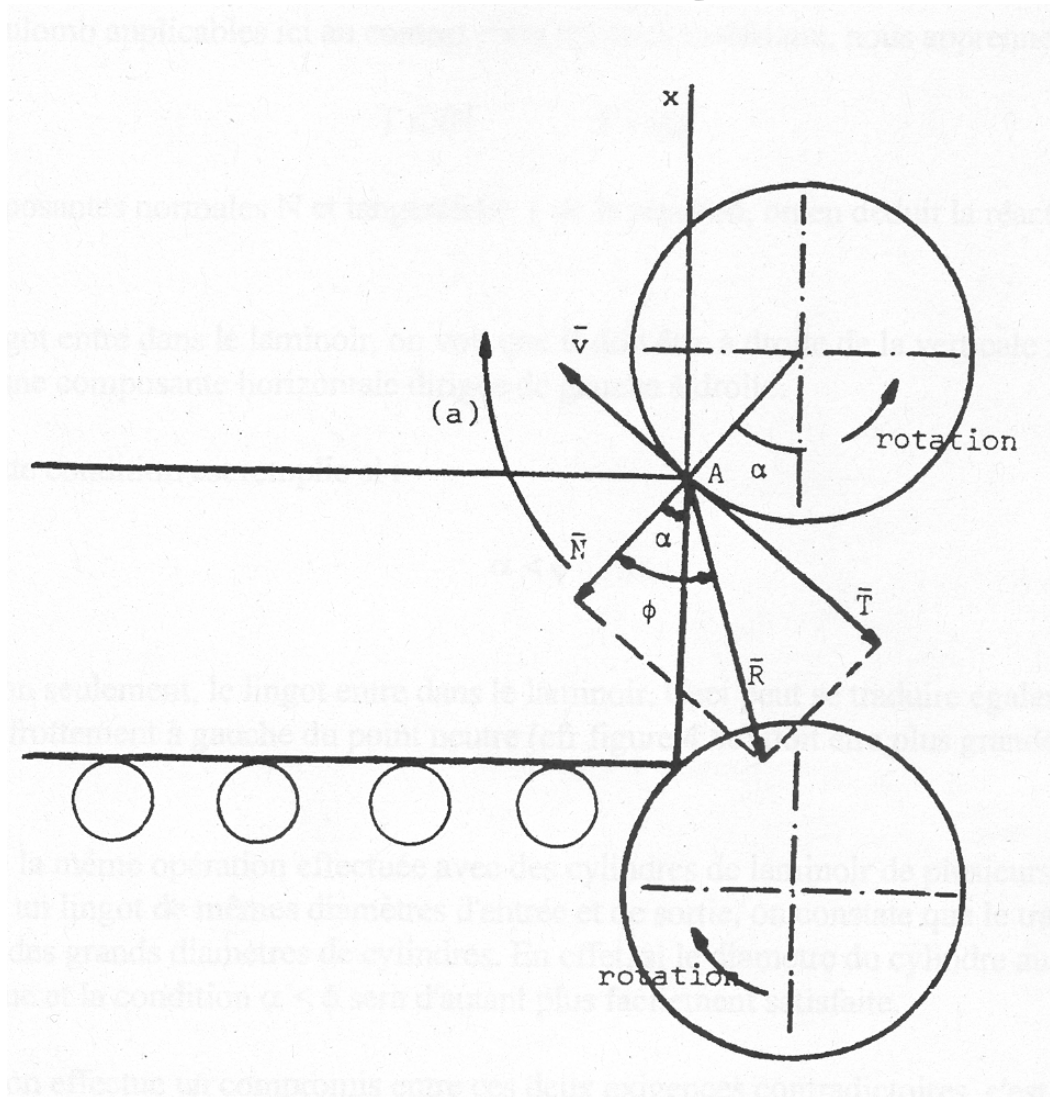
# Le laminage longitudinal ou parallèle (et plan)



# Entrée du lingot dans le laminoir



# Entrée du lingot dans le laminoir



$$N \sin(\alpha) < T \cos(\alpha)$$

$$\text{Or } T = \mu N$$

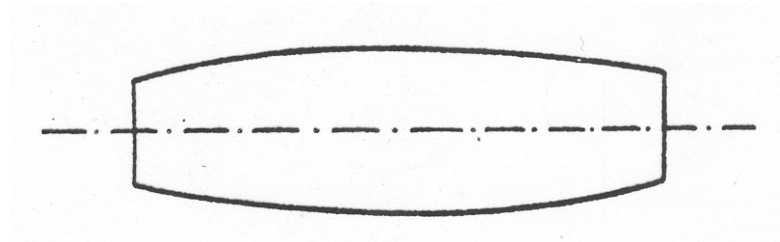
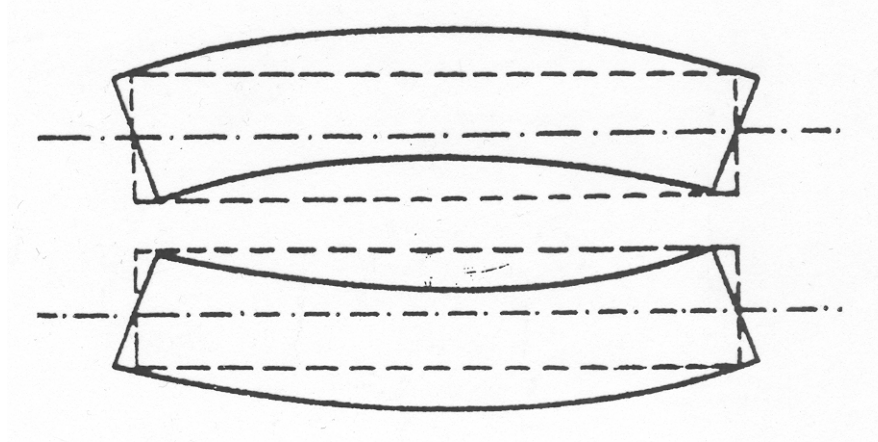
$$\mu > \tan(\alpha)$$

De plus,

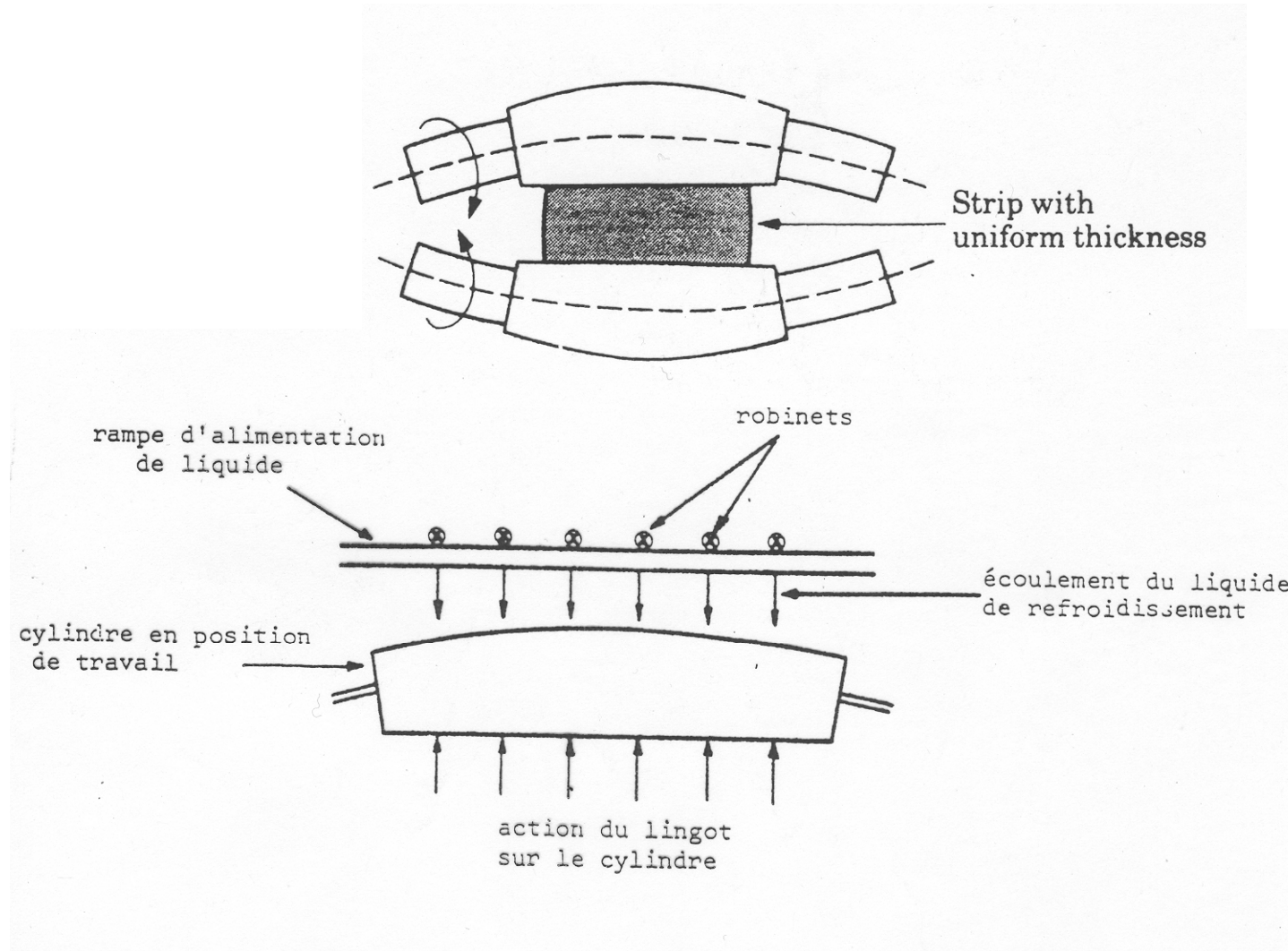
$$\tan(\phi) = T/N = \mu$$



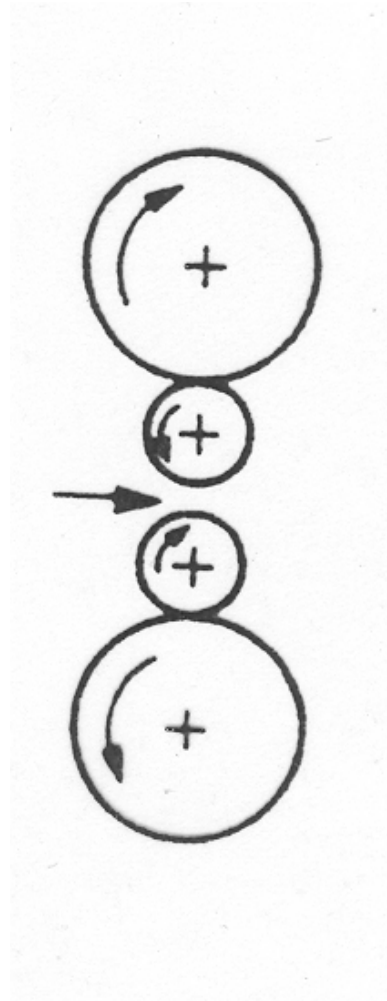
# Déformations des cylindres de laminage



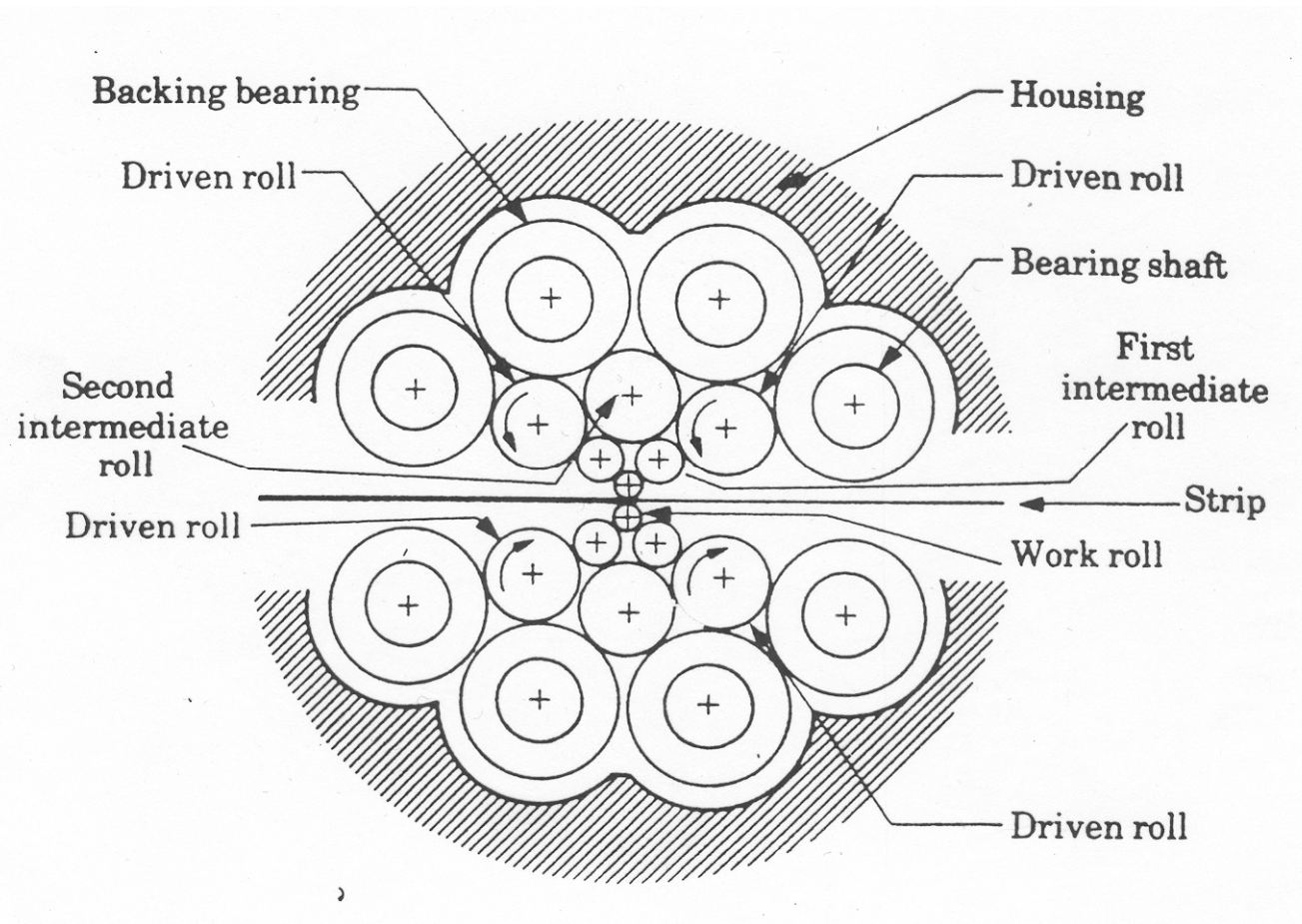
# Déformations des cylindres de laminage



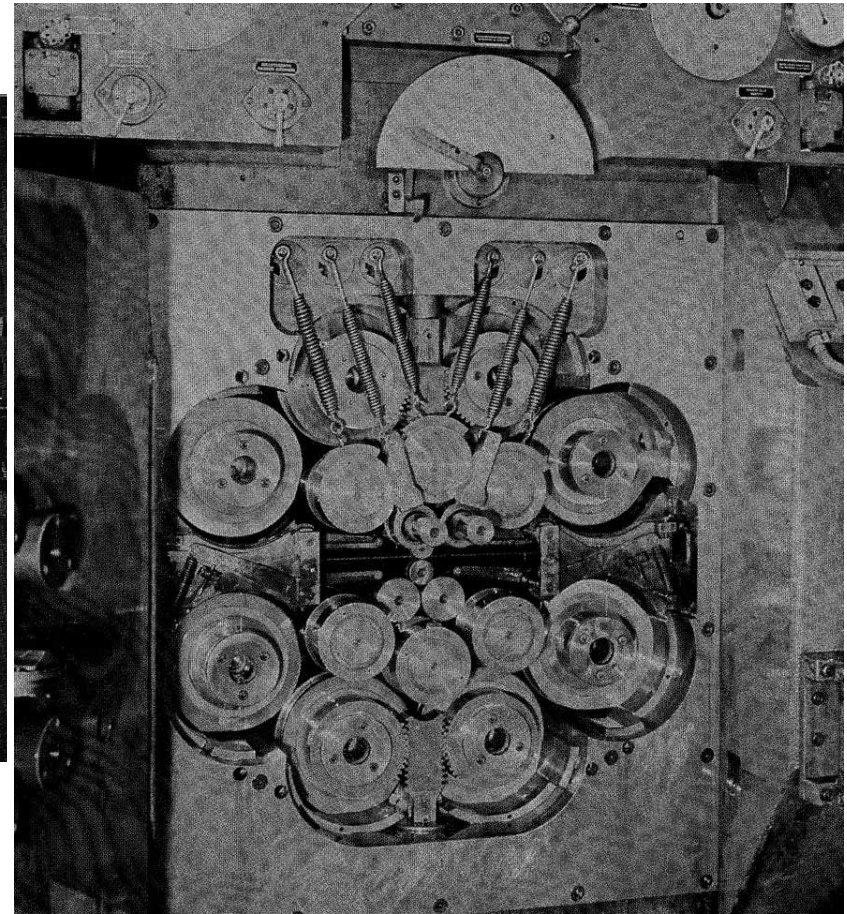
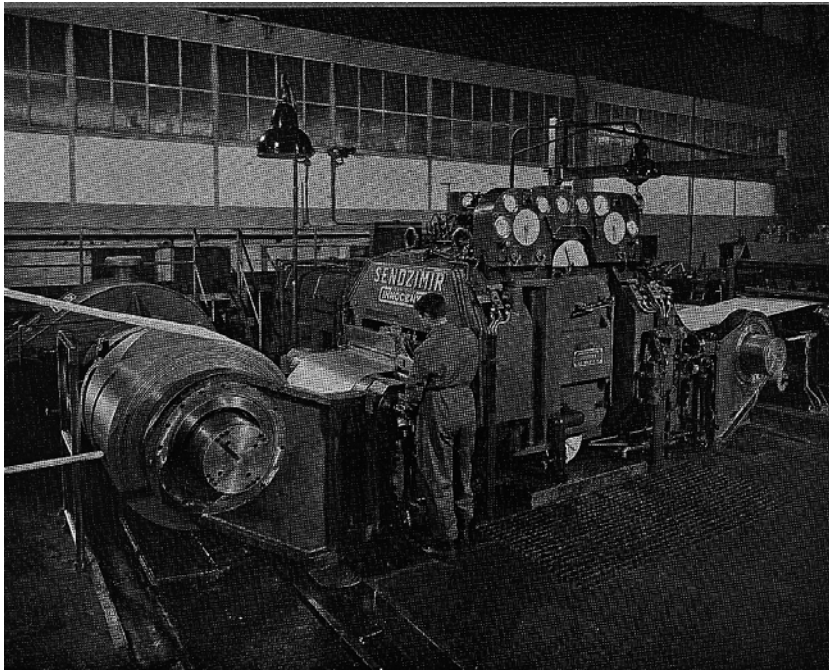
# Laminoir quarto



# Laminoir à 20 cylindres ou Sendzimir



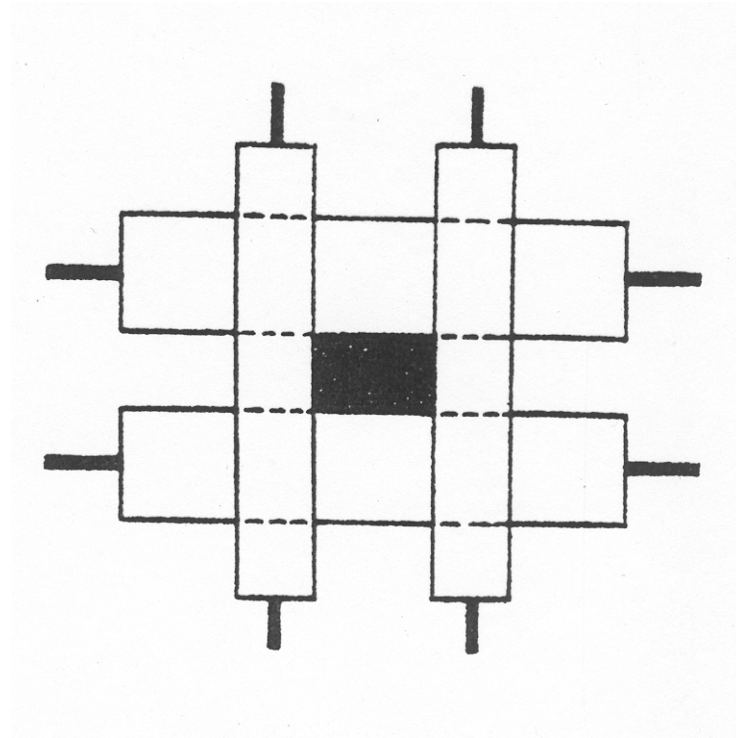
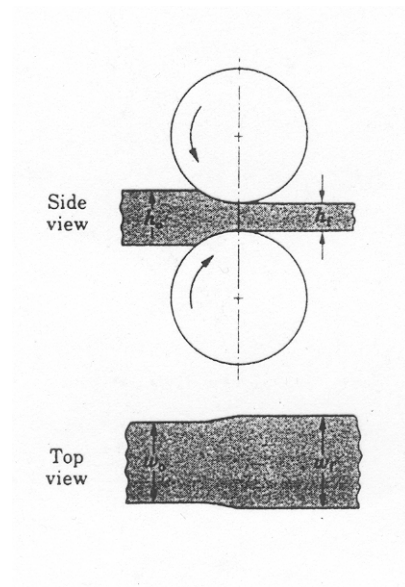
# Laminoir à 20 cylindres ou Sendzimir



### Exemple d'installation classique de laminoir Sendzimir :

- vitesse : 7,50 m/sec
- bobine : 9 T
- traction : 20 T
- épaisseur de la tôle : 0,25 mm
- largeur de la tôle : 1,37 m
- diamètre des cylindres lamineurs : 50 mm
- puissance : 3380 kW
  - dont (2 x 940 kW pour la passe)
  - (2 x 750 kW pour les enrouleurs)
- largeur de la machine : 1,40 m
- hauteur de la machine : 2 m

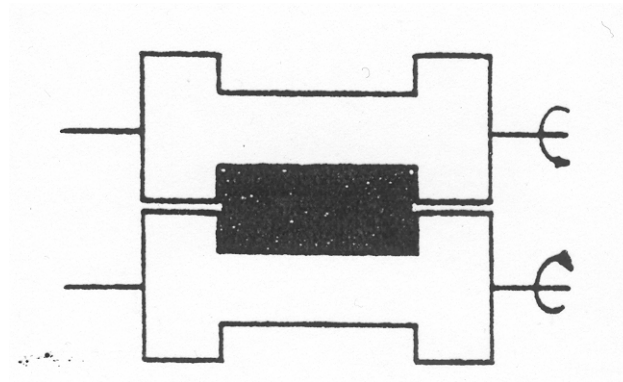
# Déformation latérale du lingot



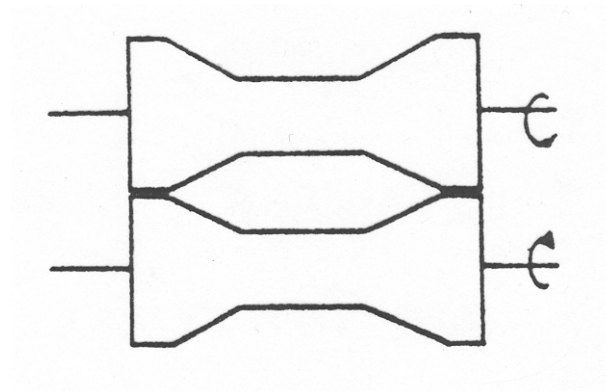


# Laminage de mise en forme

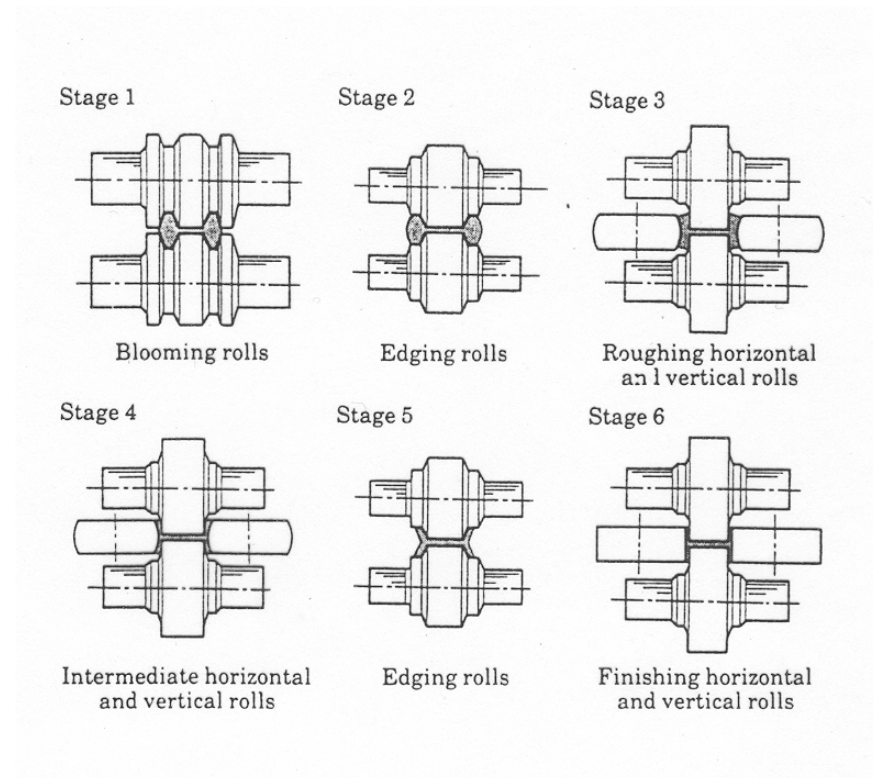
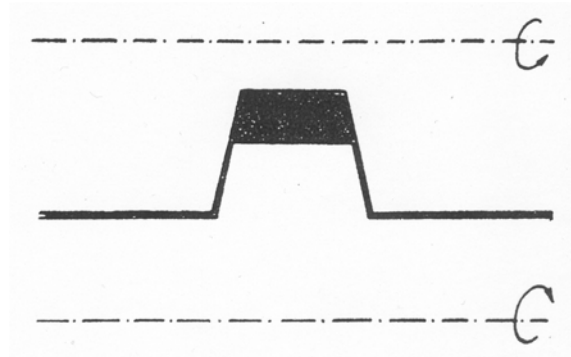
- les cannelures fermées



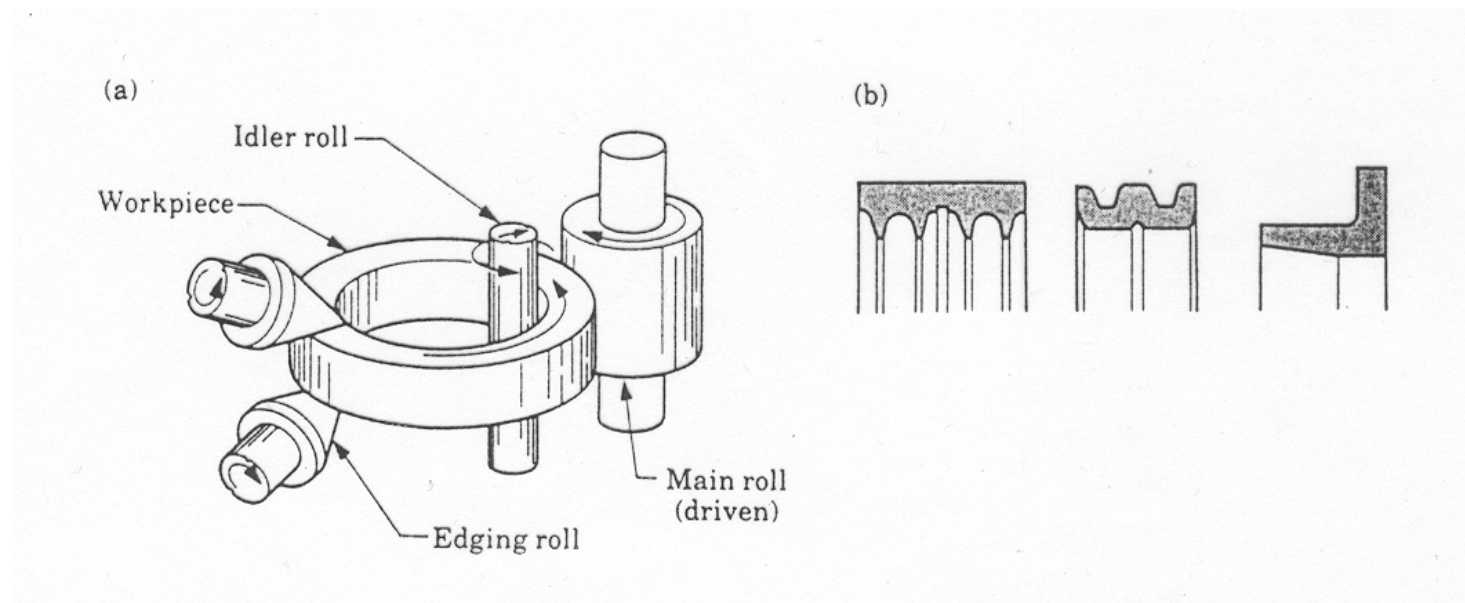
- les cannelures ouvertes

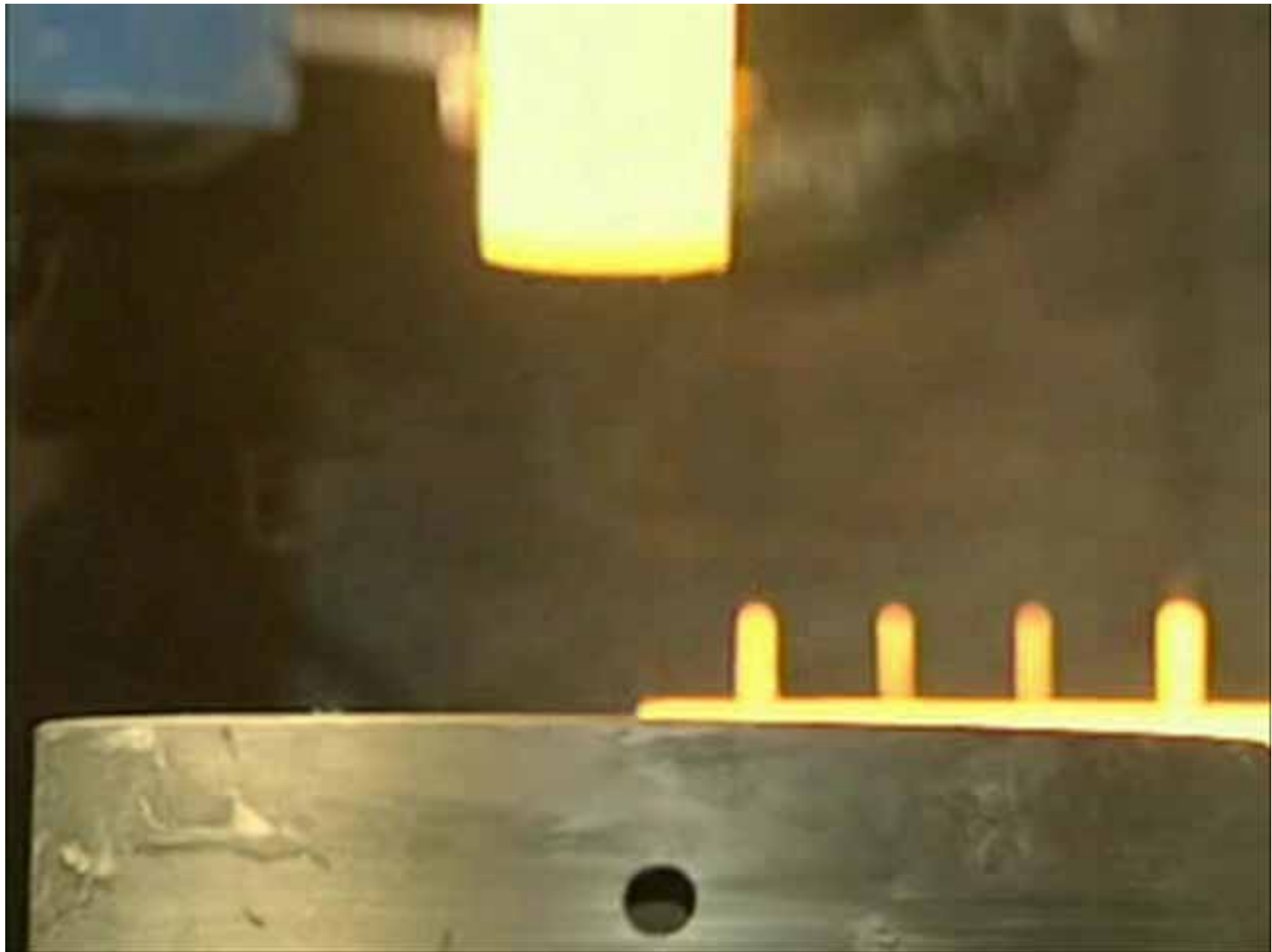


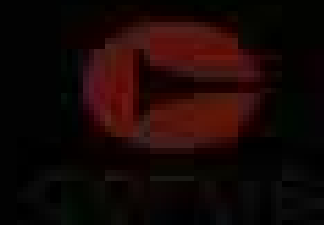
- les cannelures emboîtantes



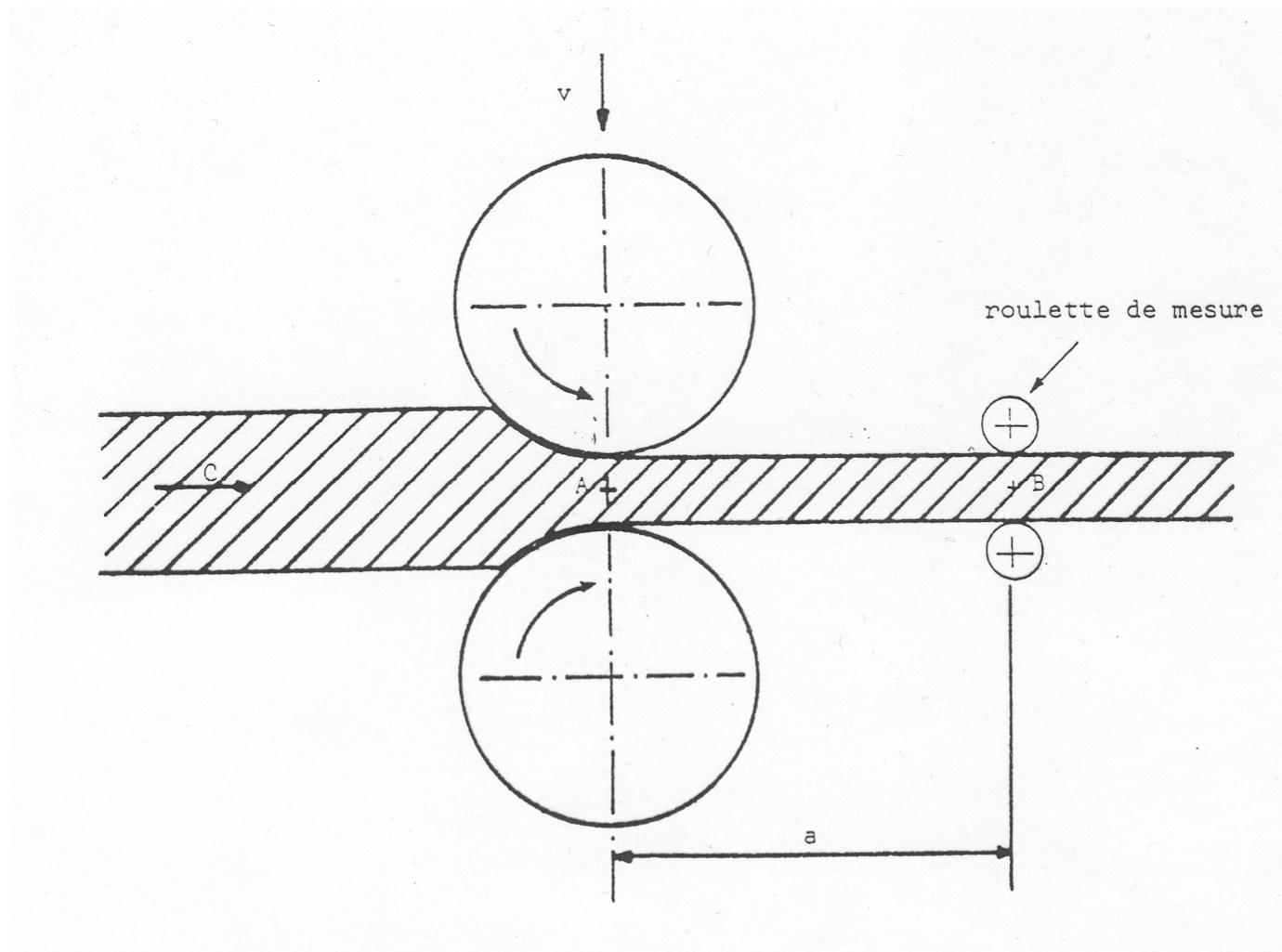
# Le laminage circulaire







# Contrôle des laminoirs



Soit  $c$  la vitesse de défilement de la tôle et  $e_0$  l'épaisseur imposée à la sortie du laminoir.

Il faut contrôler l'épaisseur en continu après le laminoir. Dans ce but, on place deux roulettes à une certaine distance  $a$  de l'endroit où on lamine (A).

Supposons qu'à un certain moment, on mesure en B une épaisseur  $e_0 + y_B$ . Si  $y_B$  est positif, il faut rapprocher les deux cylindres.

On doit donc trouver une loi qui lie l'épaisseur à l'écartement des cylindres.



Pour que  $y = 0$ , il faut que les cylindres restent immobiles, ou que la vitesse  $v$  des cylindres soit nulle.

Il faut que la loi de déplacement des cylindres change de signe avec  $y$ ,  $v$  doit donc changer de signe avec  $y$ .

Soit :  $dy_A/dt = f(y_B)$ ,  $f$  doit donc être impaire.

Développons la fonction en série :

$$dy_A/dt = - (k y_B + k_1 y_B^3 + k_2 y_B^5 + \dots)$$

On se limite au premier terme :  $dy_A/dt = - k y_B$ , on prend ainsi la loi la plus simple.

Soit,  $\tau$  le temps entre le passage d'un y en A et en B :

$$\tau = a/c$$

Si on considère un laminoir à vitesse constante,  $\tau$  est une constante.

On peut écrire alors l'équation différentielle à retard :

$$dy(t)/dt = -k y(t - \tau) \quad y_B = y(t - \tau)$$

$$y_A = y(t)$$

On considère une perturbation d'épaisseur sur le laminoir. Il faut que le laminoir l'annule mais il faut craindre qu'il ne se mette à osciller.

Étudions la stabilité des solutions.

Cherchons une solution de la forme :  $e^{rt}$ .

Dans ce cas, on a :  $y(t) = e^{rt}$

$$\begin{aligned} y(t-\tau) &= e^{r(t-\tau)} = e^{-r\tau} \cdot e^{rt} \\ dy(t)/dt &= r e^{rt} \end{aligned} \quad (4)$$

Equation caractéristique transcendante :

$$r + k e^{-r\tau} = 0 \quad (1)$$

Il faut chercher les valeurs de  $r$  qui vérifient cette équation. En général, l'équation transcendante a une infinité de solutions.

L'équation (1) peut être écrite :

$$(r\tau) + k \tau e^{-(r\tau)} = 0$$

$r$  est en général, racine complexe :

$$r \tau = a + j\omega$$

Le problème est de connaître le signe de  $a$ .

Le système est stable si les solutions tendent vers zéro dans le temps.

Il faut que  $a$  soit négatif.

Imaginons  $\tau = 0$  : l'équation devient :

$$dy/dt + ky = 0$$

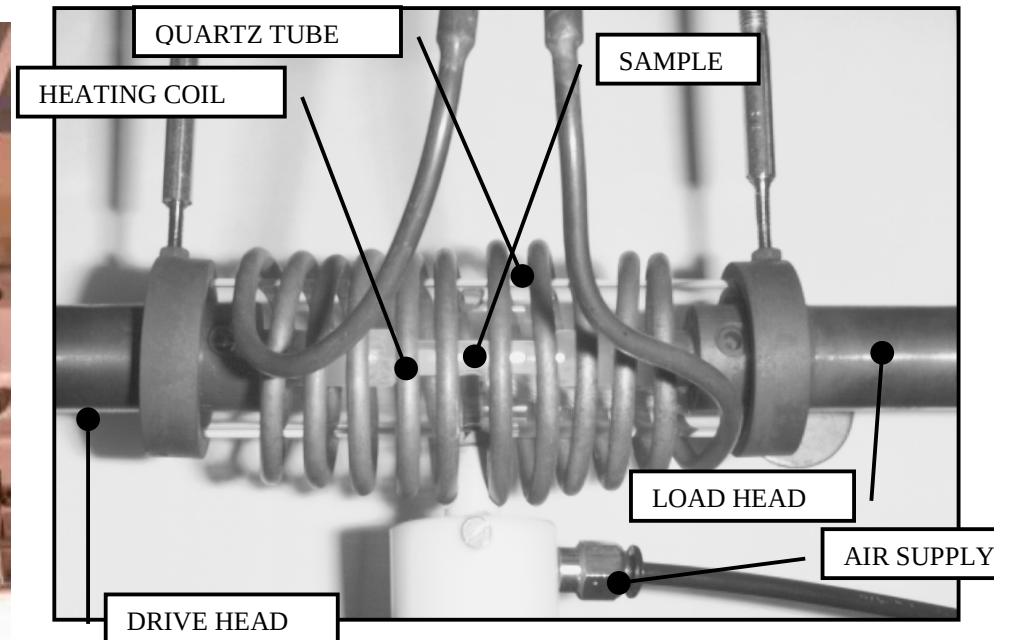
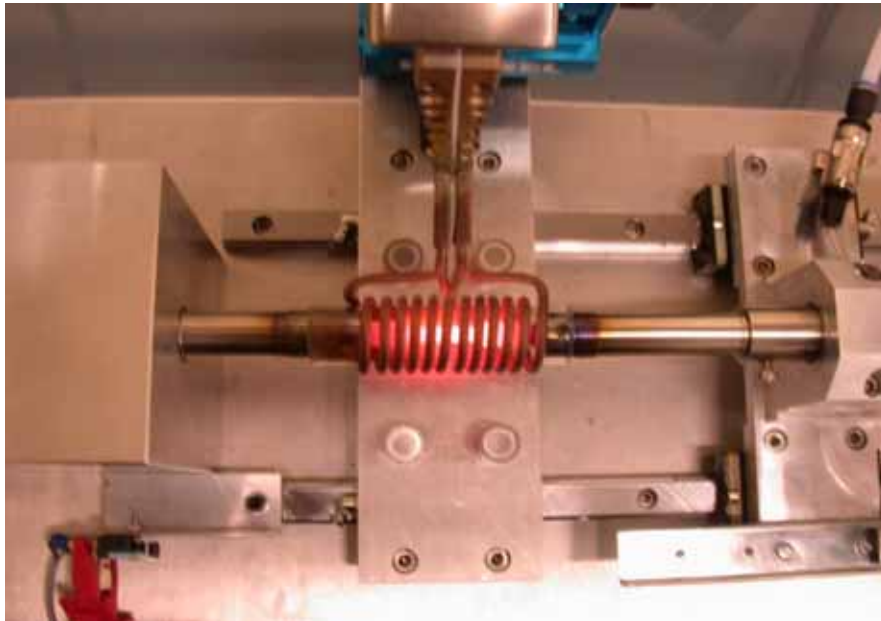
Solution :  $y = e^{-kt}$

Le système est toujours stable.

**L'instabilité est donc créée par le retard de la transmission de l'information.**

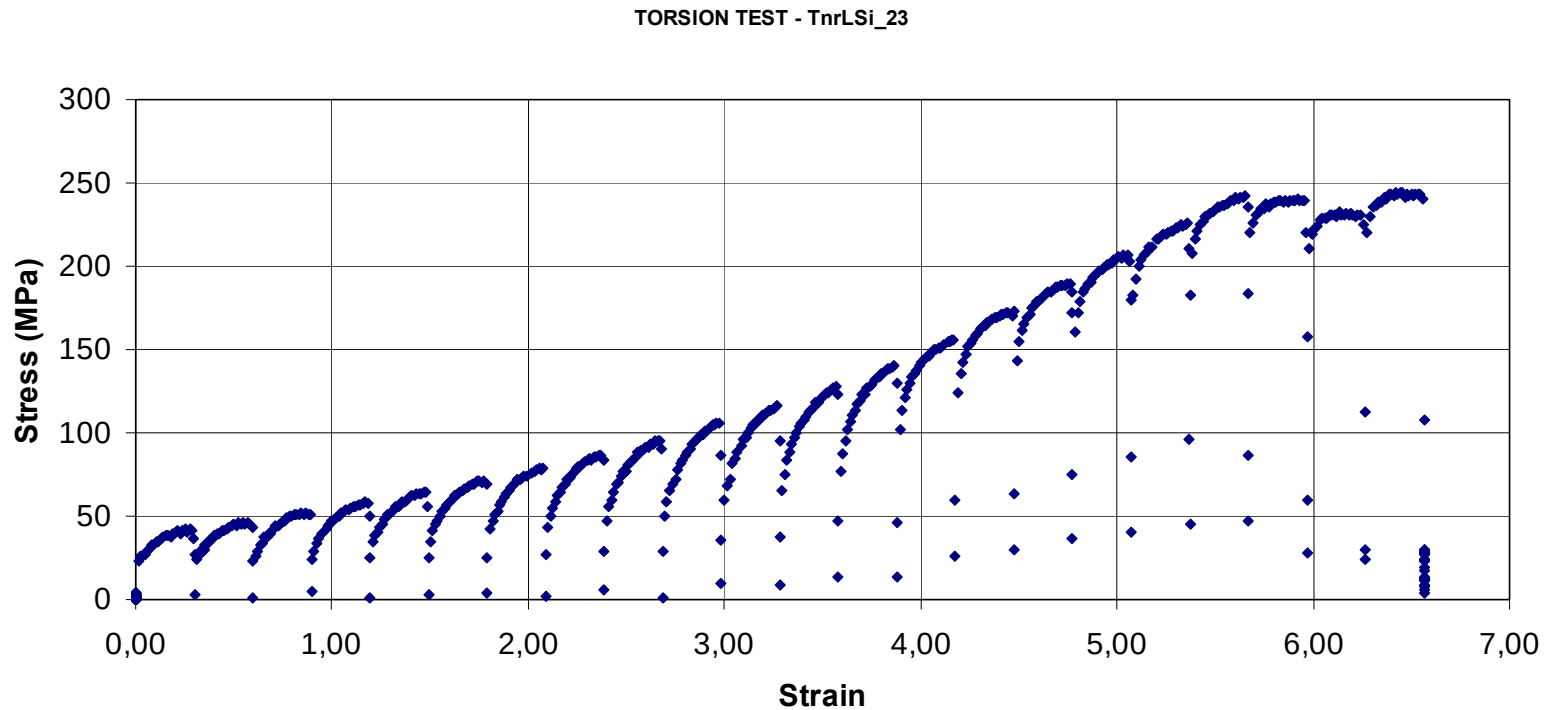
# Comment étudier le laminage en laboratoire?

Des réductions d'épaisseur importante sont très difficiles à reproduire en laboratoire.



# Comment étudier le laminage en laboratoire?

**Des réductions d'épaisseur importante sont très difficiles à reproduire en laboratoire.**

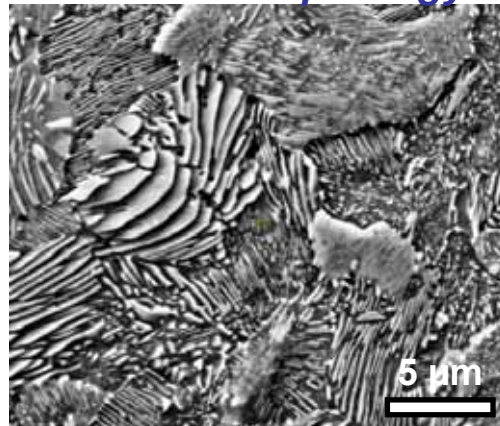




# Un exemple: laminage d'aciers à haut carbone

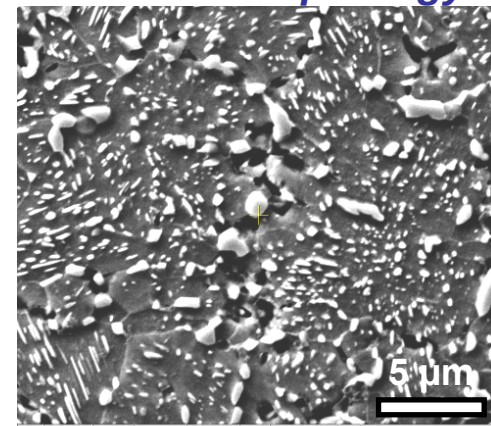
- ✓ Alloying with carbon is a very powerful and cheap way to strengthen iron compared to other alloying elements.
- ✓ Pearlite is a very versatile structure allowing a wide range of mechanical properties.

*Lamellar morphology*



- High strength
- Mechanical properties unsuitable for further cold treatment

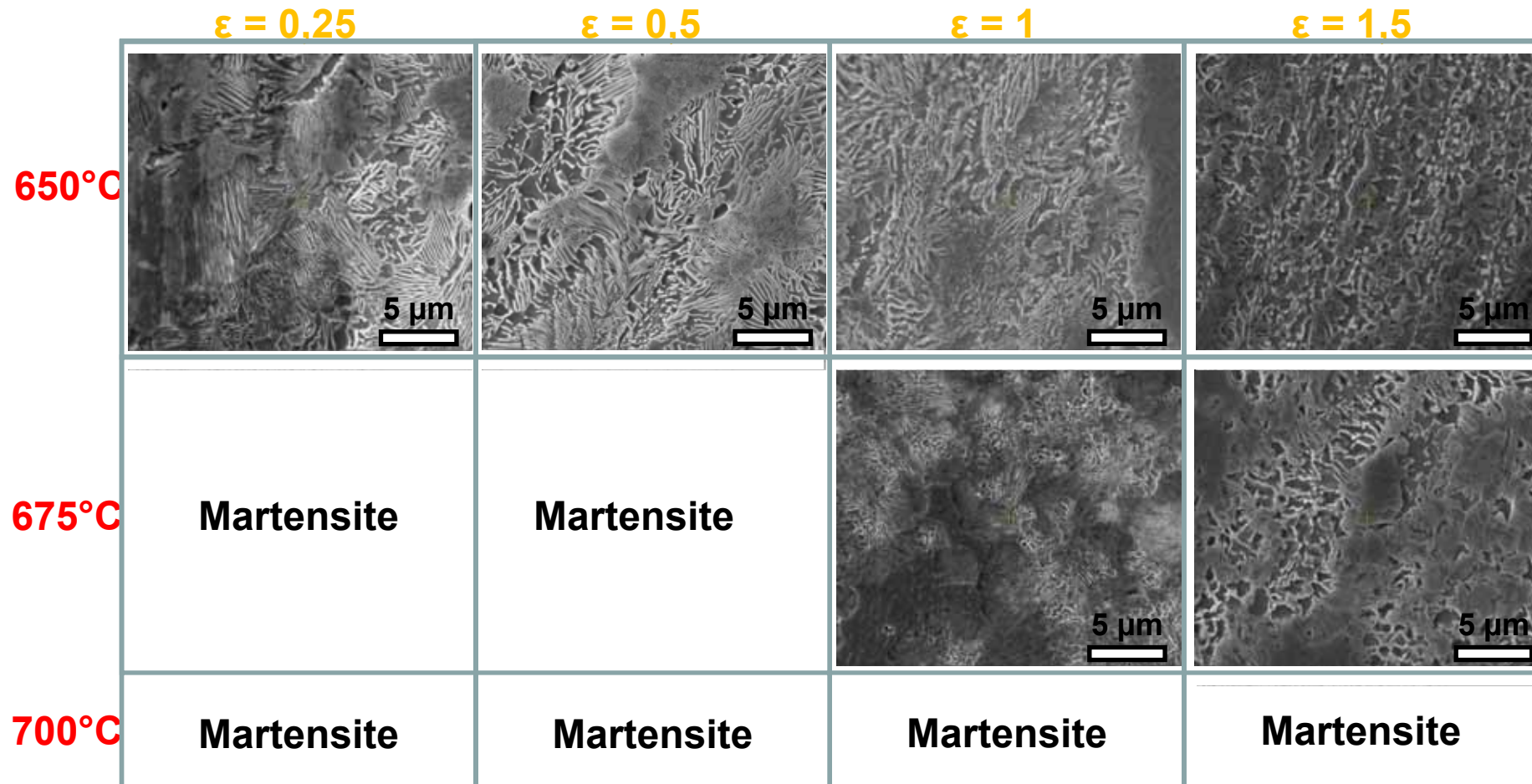
*Globular morphology*



- High toughness
- Good cold formability and machinability

Pour passer d'une morphologie lamellaire à une morphologie globulaire: recuit de 24h à 700°C...

Peut-on s'en passer?

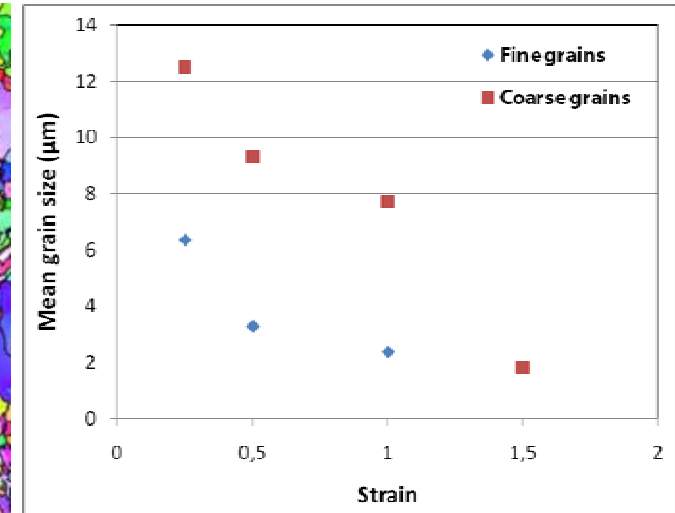
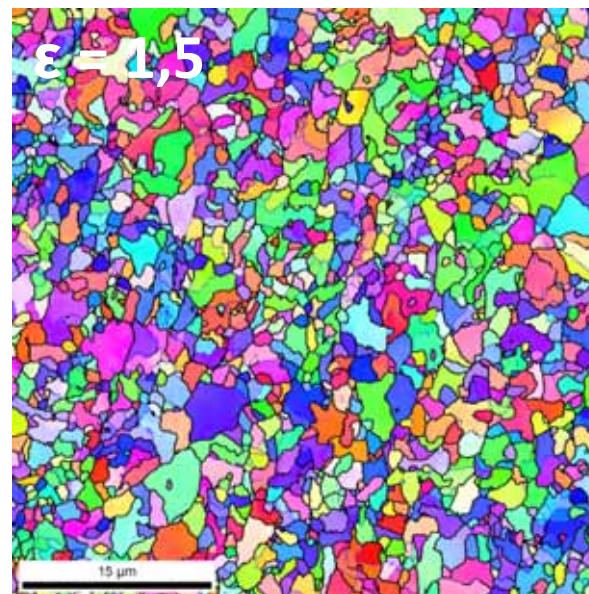
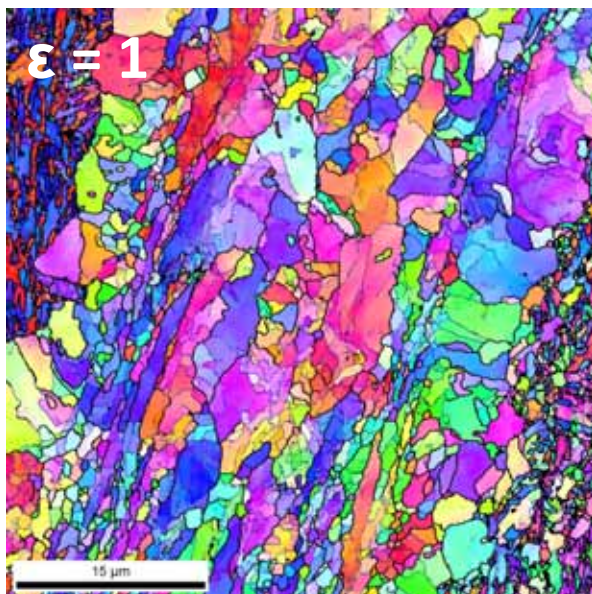
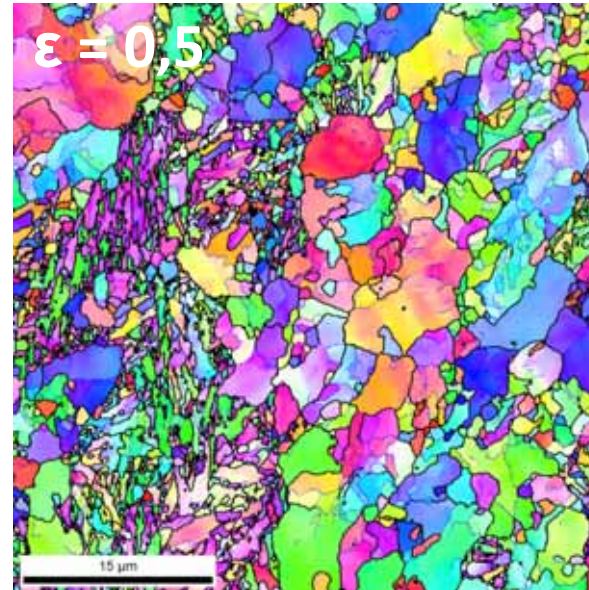
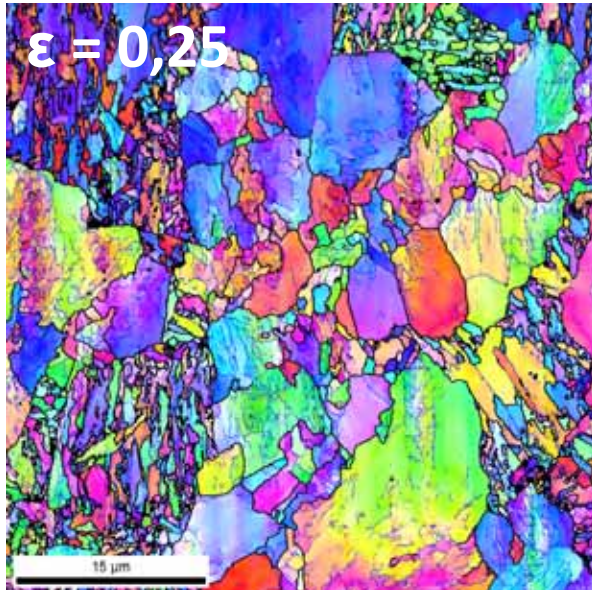


- Deformation induces the *pearlite transformation*
- Upon further straining, the colonies of lamellar pearlite are progressively *spheroidized*.



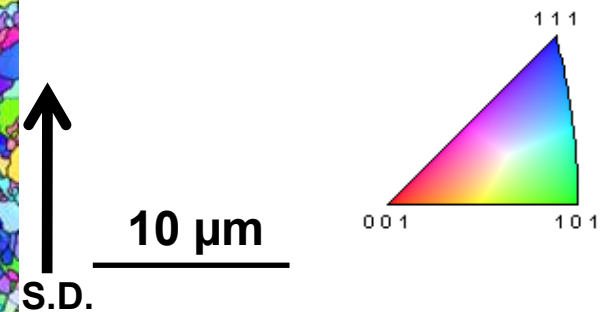
# Grain size evolution

EBSD IPF(100) MAPS



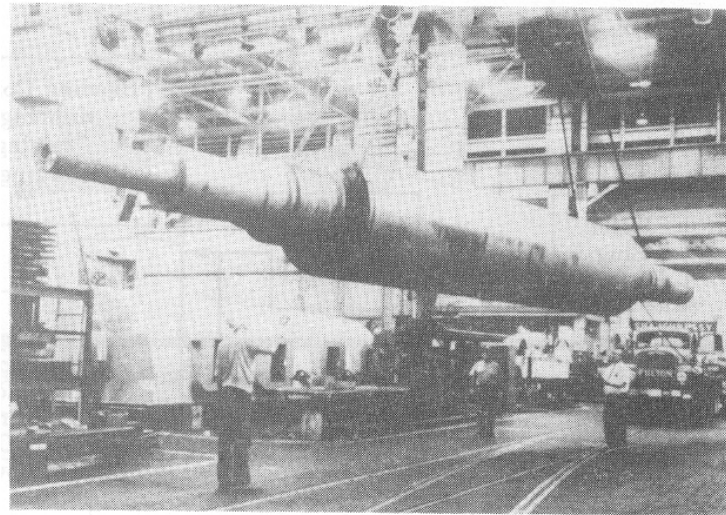
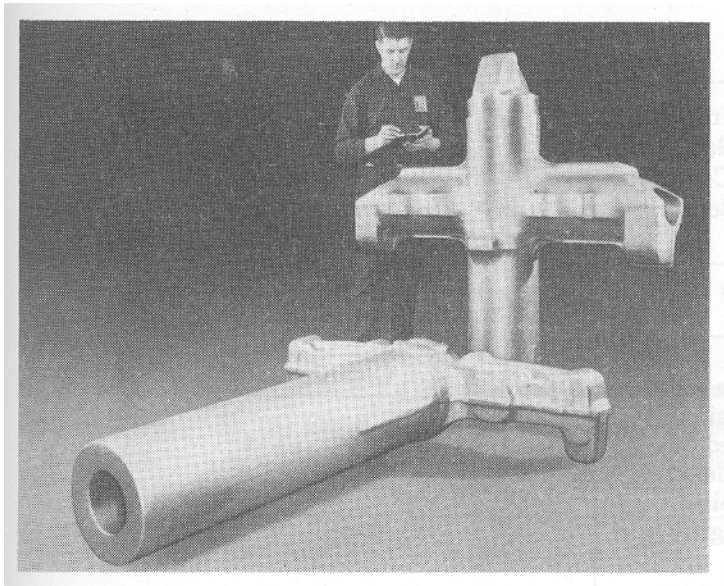
Ferrite grain size : Bimodal distribution.

Grain size **reduces** up to 2  $\mu\text{m}$  as strain increases.

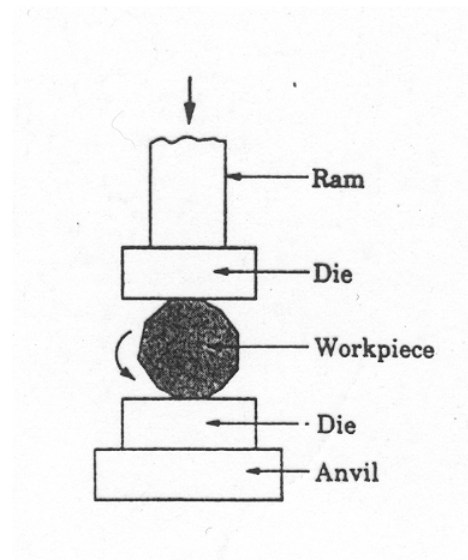
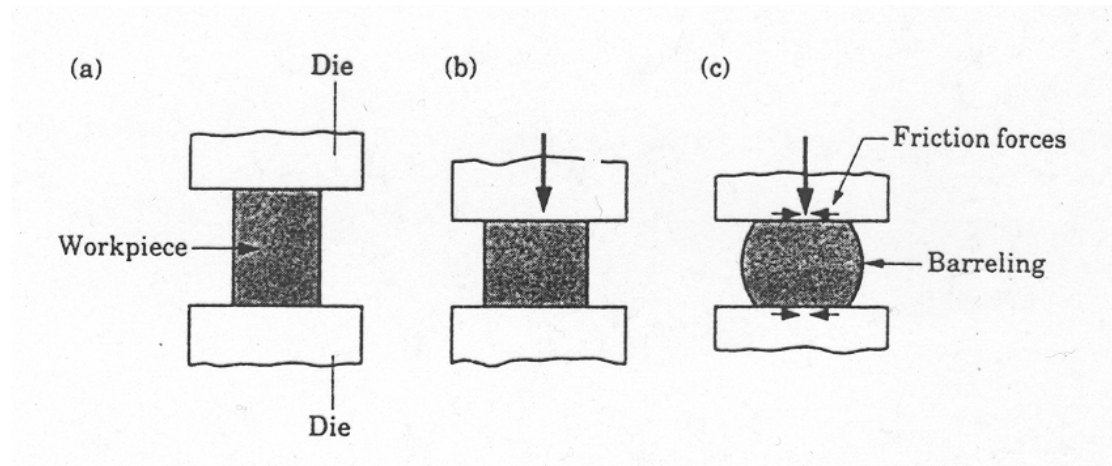


# Le forgeage

Le forgeage consiste à déformer des métaux préalablement chauffés ou non soit par chocs, soit par pression, dans le but de produire des pièces semi-finies de formes et dimensions préétablies.



# Forgeage libre (*open-die forging*)

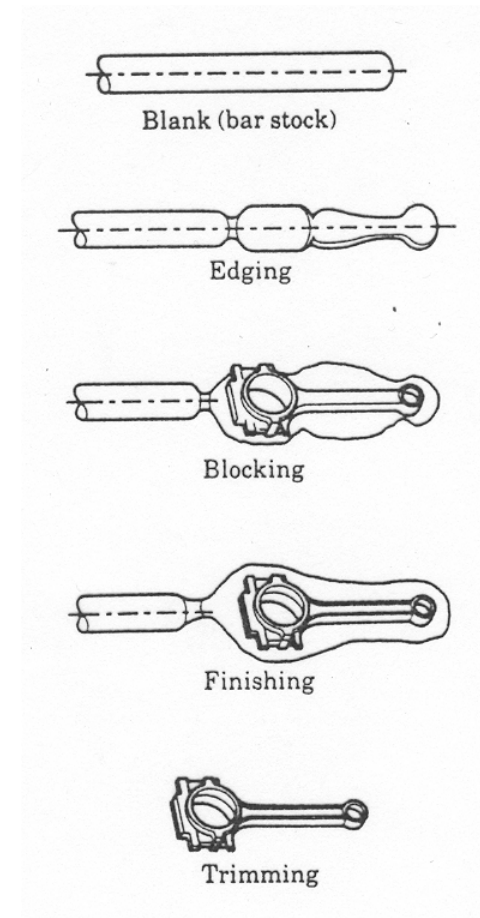
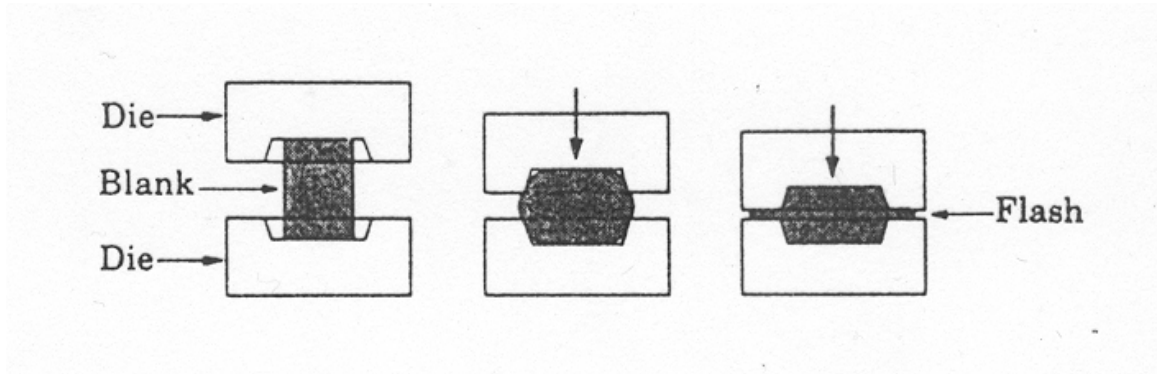






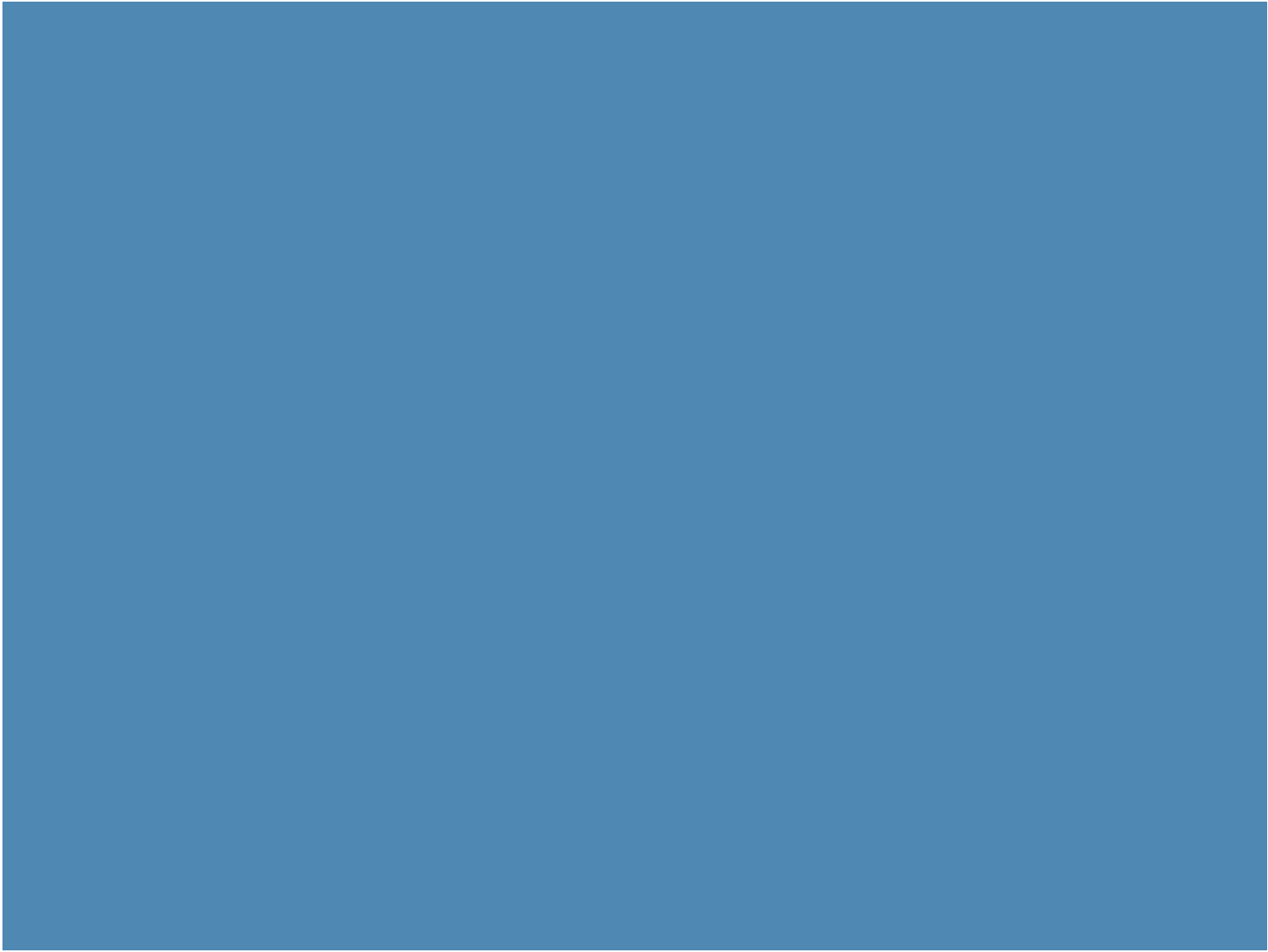


# Forgeage à matrice fermée (*impression-die and close-die forging*)





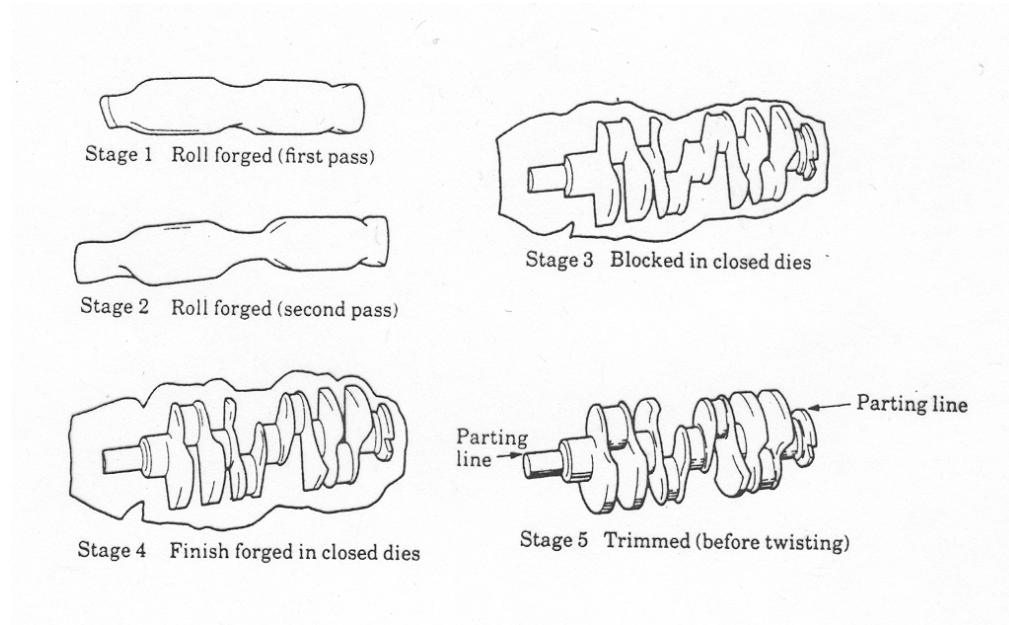


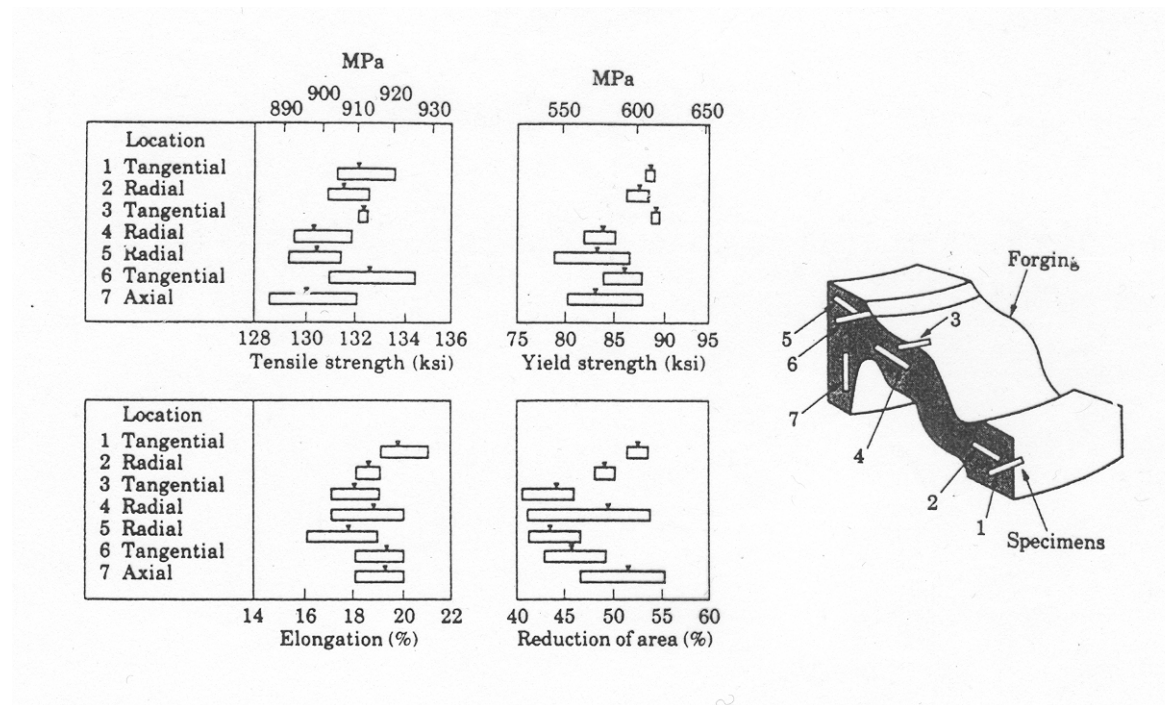


# Conception des matrices de forgeage (*forging-die*)

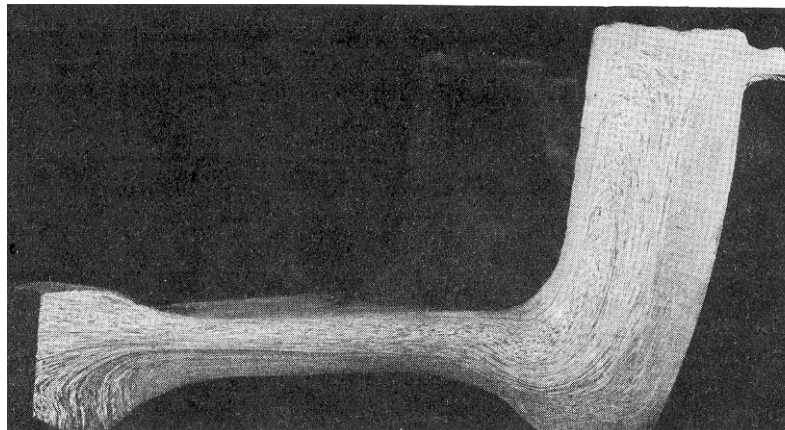
La conception exige une connaissance :

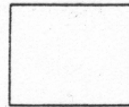
- de la résistance et de la ductilité du matériau de la pièce,
- de sa sensibilité à la déformation et à la température,
- de ses caractéristiques de frottement,
- de la forme et complexité de la pièce.





Variation des propriétés mécaniques au sein d'un même composant forgé (pièce de diamètre 0,6 m et de poids : 70 kg).





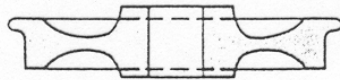
Step 1 Wheel block before forging



Step 2 Wheel blank after first forging



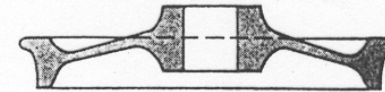
Step 3 Wheel blank after second forging



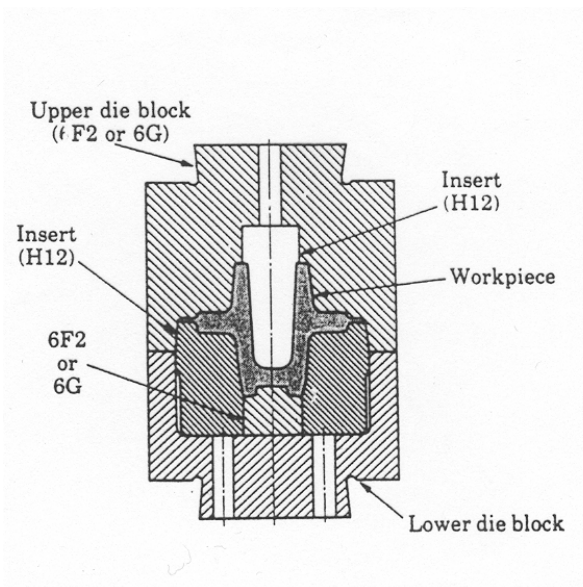
Step 4 Wheel blank after being punched



Step 5 Wheel after rolling

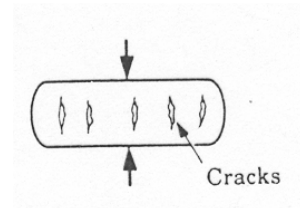


Step 6 Wheel after coning





# “Forgeabilité”

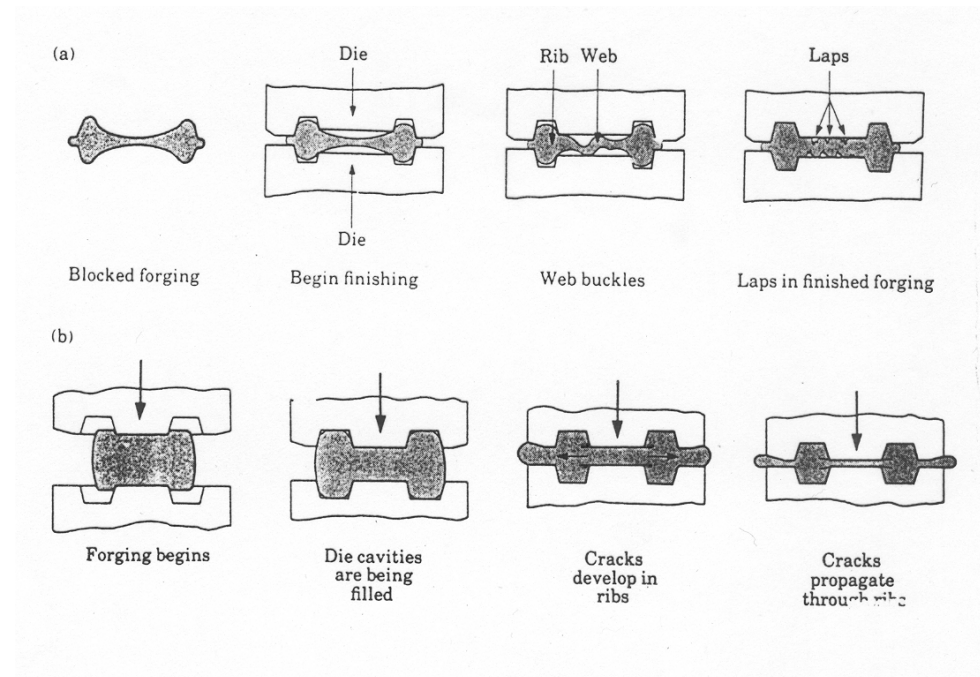


Apparition des fissures sur les faces latérales d'un cylindre

| METAL OR ALLOY               | APPROXIMATE RANGE OF FORGING TEMPERATURE (°C) |
|------------------------------|-----------------------------------------------|
| Aluminum alloys              | 400–550                                       |
| Magnesium alloys             | 250–350                                       |
| Copper alloys                | 600–900                                       |
| Carbon and low-alloy steels  | 850–1150                                      |
| Martensitic stainless steels | 1100–1250                                     |
| Austenitic stainless steels  | 1100–1250                                     |
| Titanium alloys              | 700–950                                       |
| Iron-base superalloys        | 1050–1180                                     |
| Cobalt-base superalloys      | 1180–1250                                     |
| Tantalum alloys              | 1050–1350                                     |
| Molybdenum alloys            | 1150–1350                                     |
| Nickel-base superalloys      | 1050–1200                                     |
| Tungsten alloys              | 1200–1300                                     |

Classification des métaux par ordre décroissant de leur  
"forgeabilité"





## Défauts de forgeage

Des défauts internes peuvent également apparaître à cause, par exemple, d'une déformation non uniforme du matériau dans la matrice.

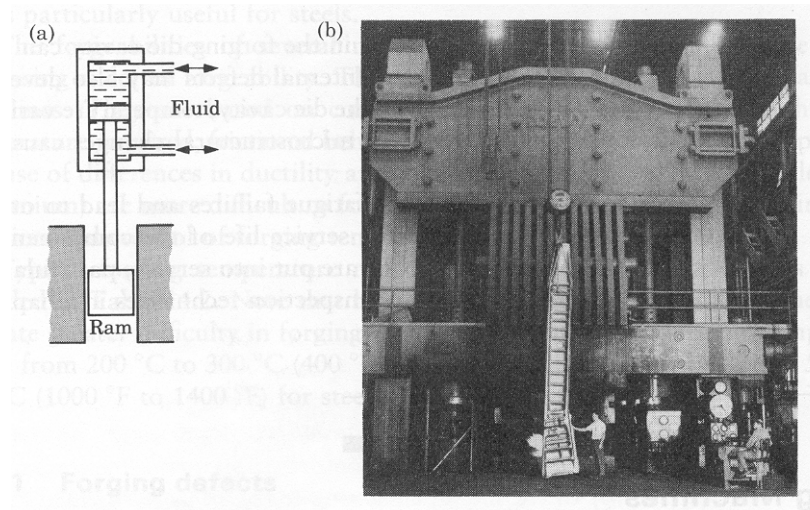
Tous ces défauts peuvent provoquer des ruptures par fatigue, de la corrosion ou de l'usure pendant la durée de vie du produit, d'où l'importance d'inspecter avec minutie les pièces forgées avant leur mise en service.

# Les machines de forgeage

## *Les presses*

### Les presses hydrauliques

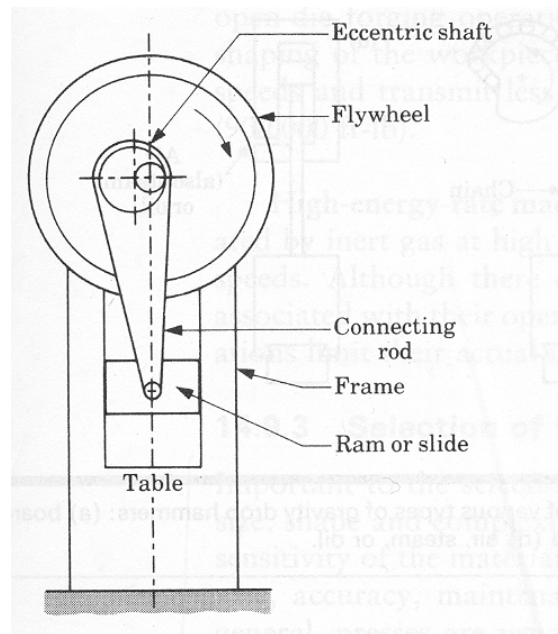
Elles fonctionnent à vitesse constante et sont limitées en charge (*load limited*) : la presse s'arrête si la charge requise excède sa capacité.



Presse hydraulique de 50.000 tonnes (pièce forgée : support de train d'atterrissage du Boeing 747 - matière : alliage de Ti - poids : 1.350 kg, longueur : 6,7 m)

Les capacités de ces presses vont jusqu'à 14.000 tonnes pour le forgeage libre et jusqu'à 75.000 tonnes pour le forgeage à matrice fermée.

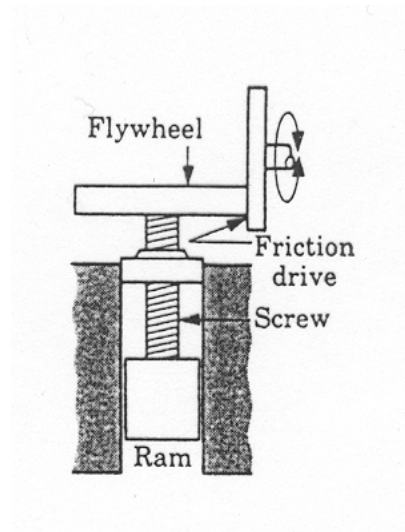
## Les presses mécaniques



Presse à excentrique

Les capacités de ces presses vont de 300 tonnes à 12.000 tonnes.

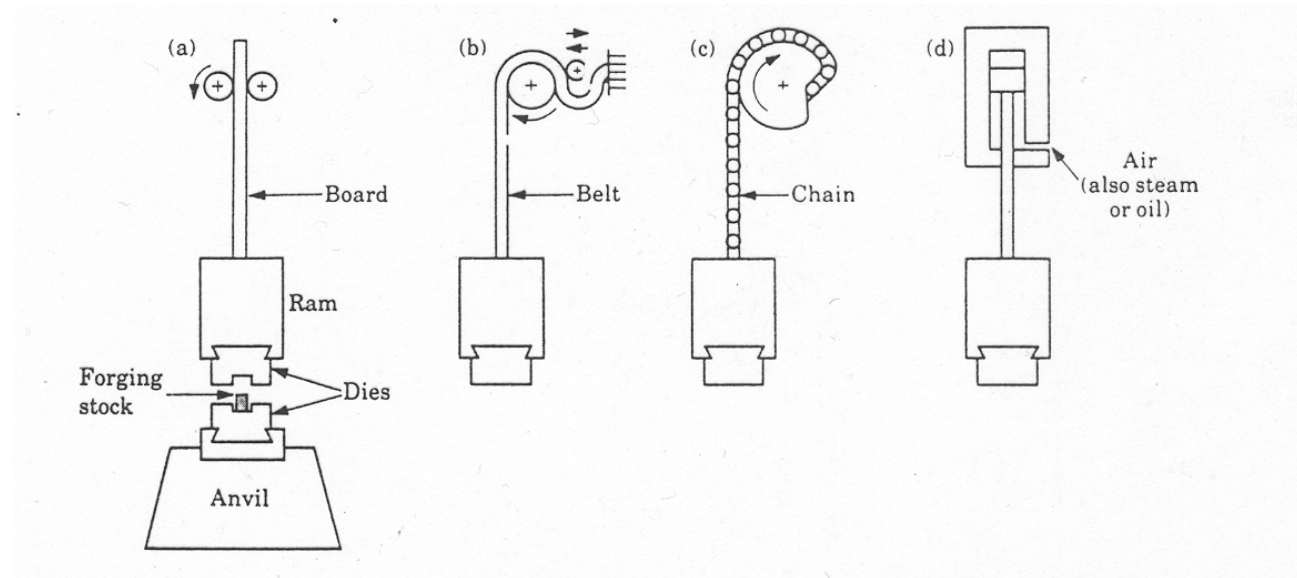
# Les presses à vis



Presse à vis

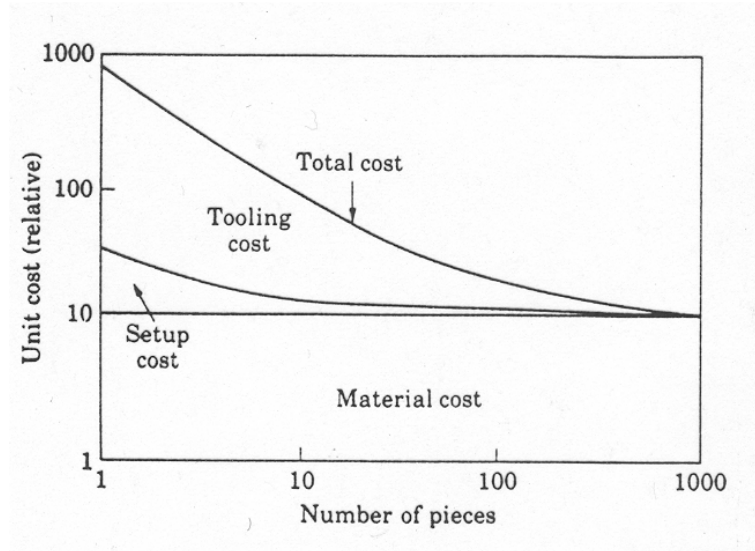
Les capacités des presses à vis vont de 160 tonnes à 31.500 tonnes.

# Les marteaux

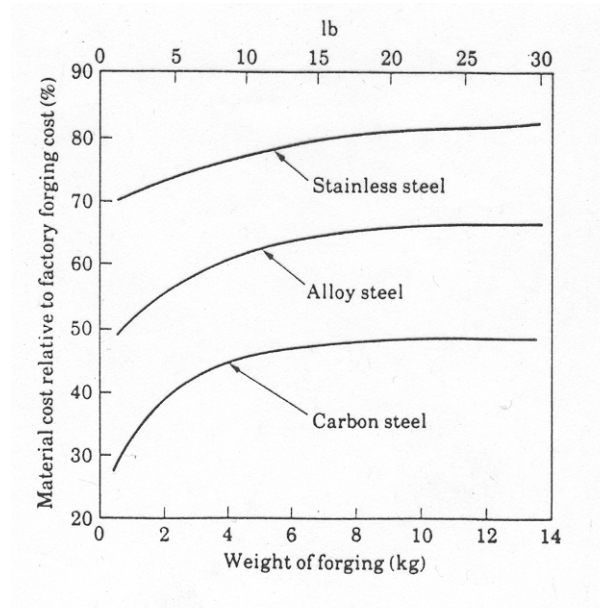


Les poids de coulisseau des 3 premiers types varient de 180 à 4.500 kg (avec des énergies atteignant les 120 kJ). Pour le 4ème type, les poids de coulisseau vont de 225 à 22.500 kg (avec des énergies atteignant les 1.150 kJ).

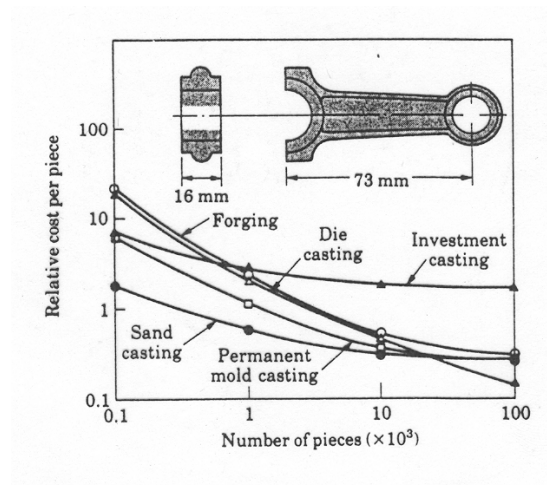
# Coût du forgeage



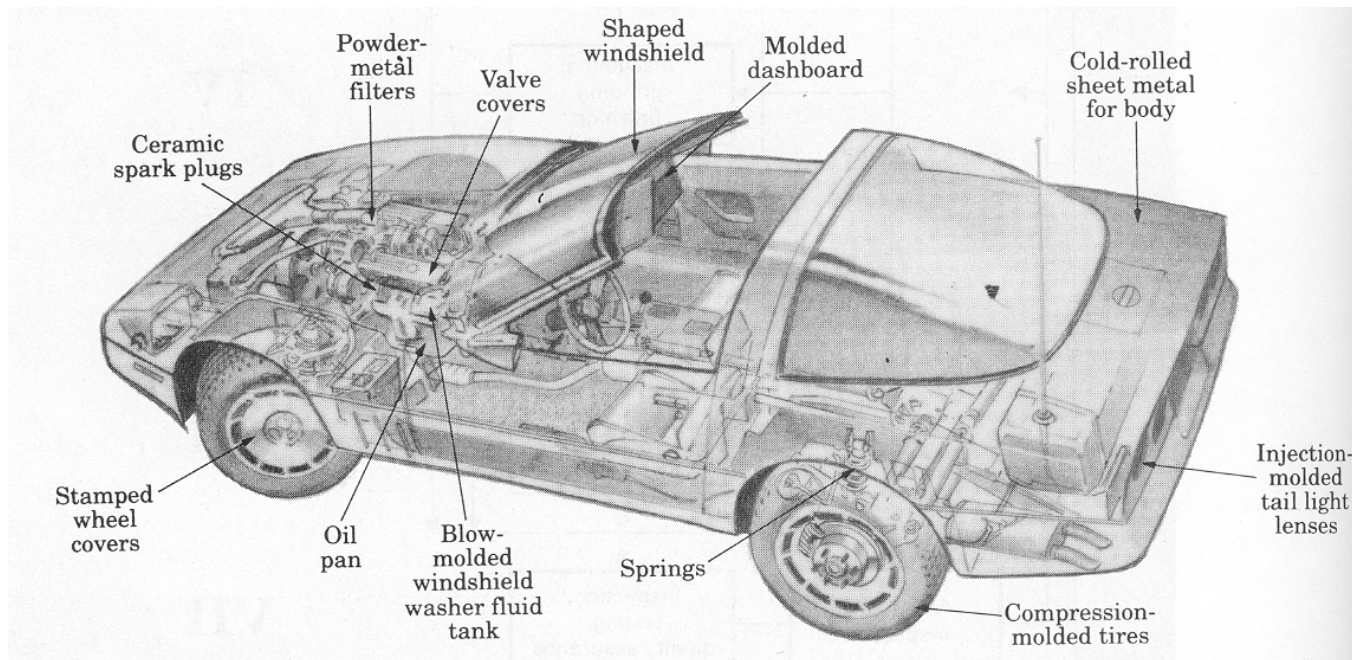
Coût par pièce en forgeage en fonction du nombre de pièces produites



Coût du matériau exprimé en pourcentage du coût total de forgeage



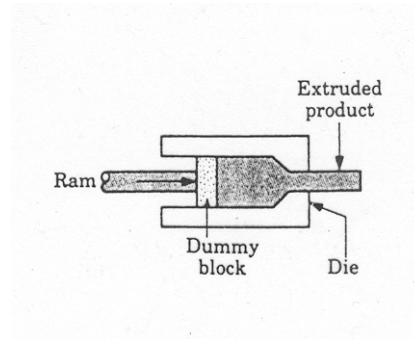
Coût unitaire d'une bielle obtenue par différents procédés en fonction des quantités de pièces produites.



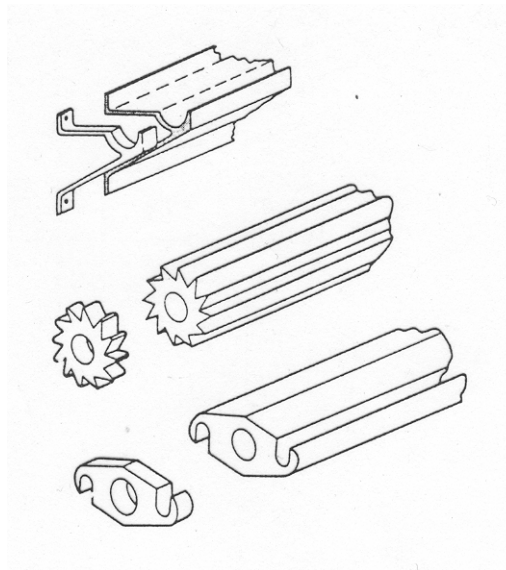
- le laminage (*rolling*),
- le forgeage (*forging*),
- **l'extrusion (*extrusion*)**,
- l'étirage (*drawing*),
- le travail de la tôle (*sheet-forming*),
- la métallurgie des poudres (*powder metallurgy*),
- la mise en forme des plastiques et des matériaux composites



# L'extrusion

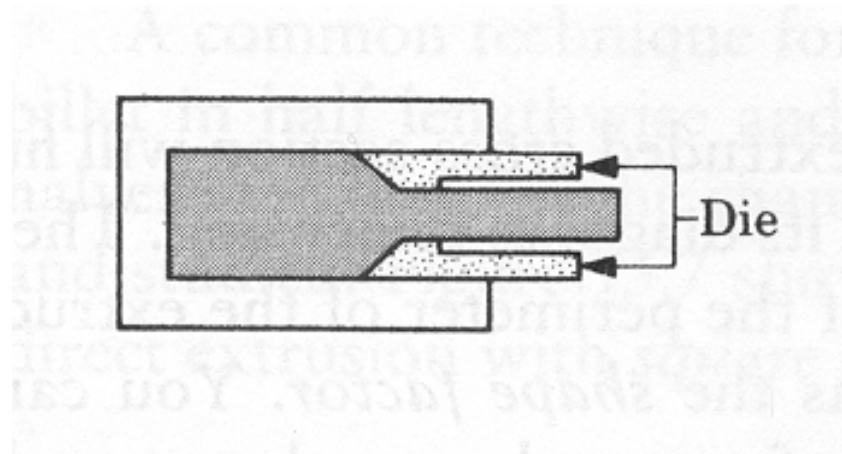


Extrusion directe



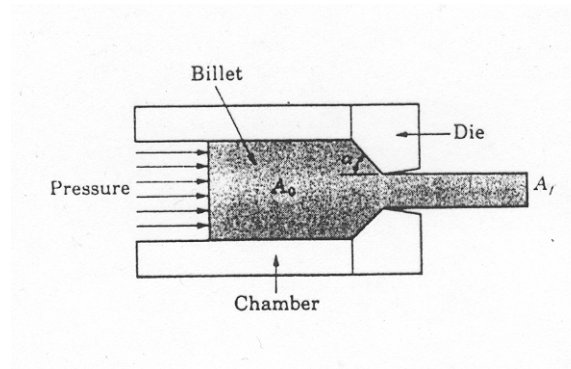
Exemples de produits extrudés

Les matériaux les plus communément employés pour l'extrusion sont l'aluminium, le cuivre, l'acier, le magnésium, le plomb, les plastiques, ...

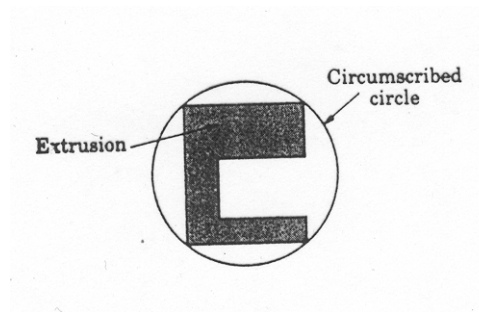


Extrusion indirecte

# Paramètres d'extrusion



## Paramètres d'extrusion



Diamètre du cercle enveloppe (*circumscribing - circle diameter*:  
CCD)

La complexité d'une extrusion est fonction :

- du rapport entre le périmètre d'un produit extrudé et sa section transversale (*shaping ratio*),
- de la température du produit à extruder,
- de la vitesse du vérin hydraulique,
- du type de lubrifiant.

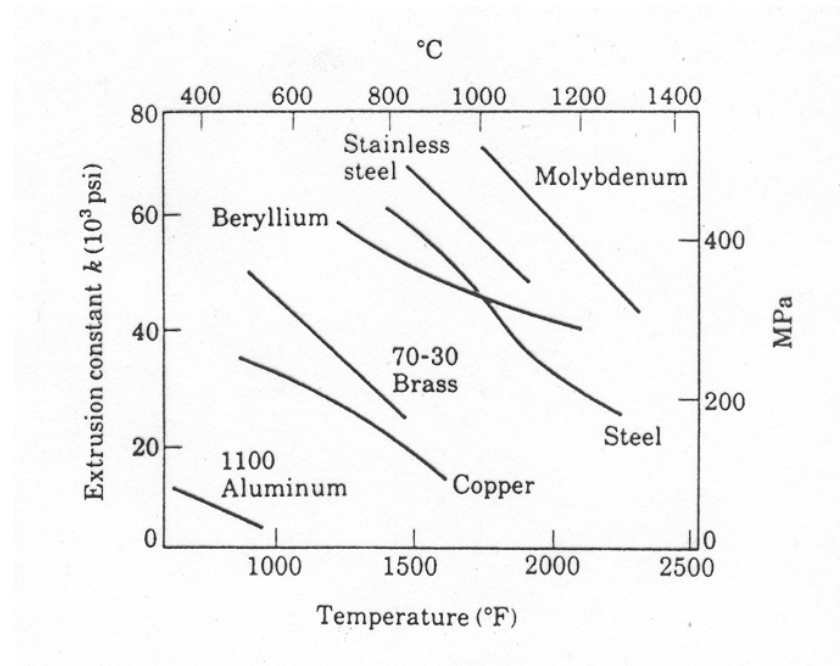
## **La force d'extrusion**

La force requise nécessaire pour mettre en oeuvre le procédé d'extrusion dépend

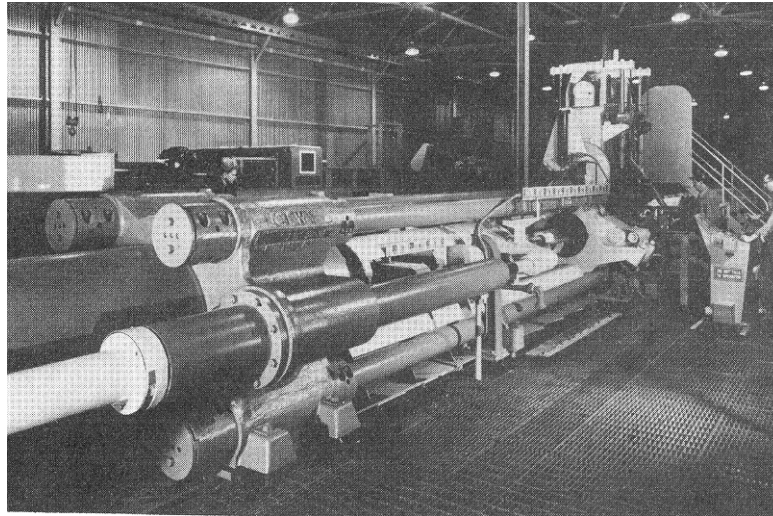
- du matériau utilisé,
- du rapport d'extrusion,
- des frottements dans la filière,
- de la température du matériau,
- de la vitesse d'extrusion.

$$F = A_o k \ln (A_o/A_f)$$

où  $k$  est la constante d'extrusion.

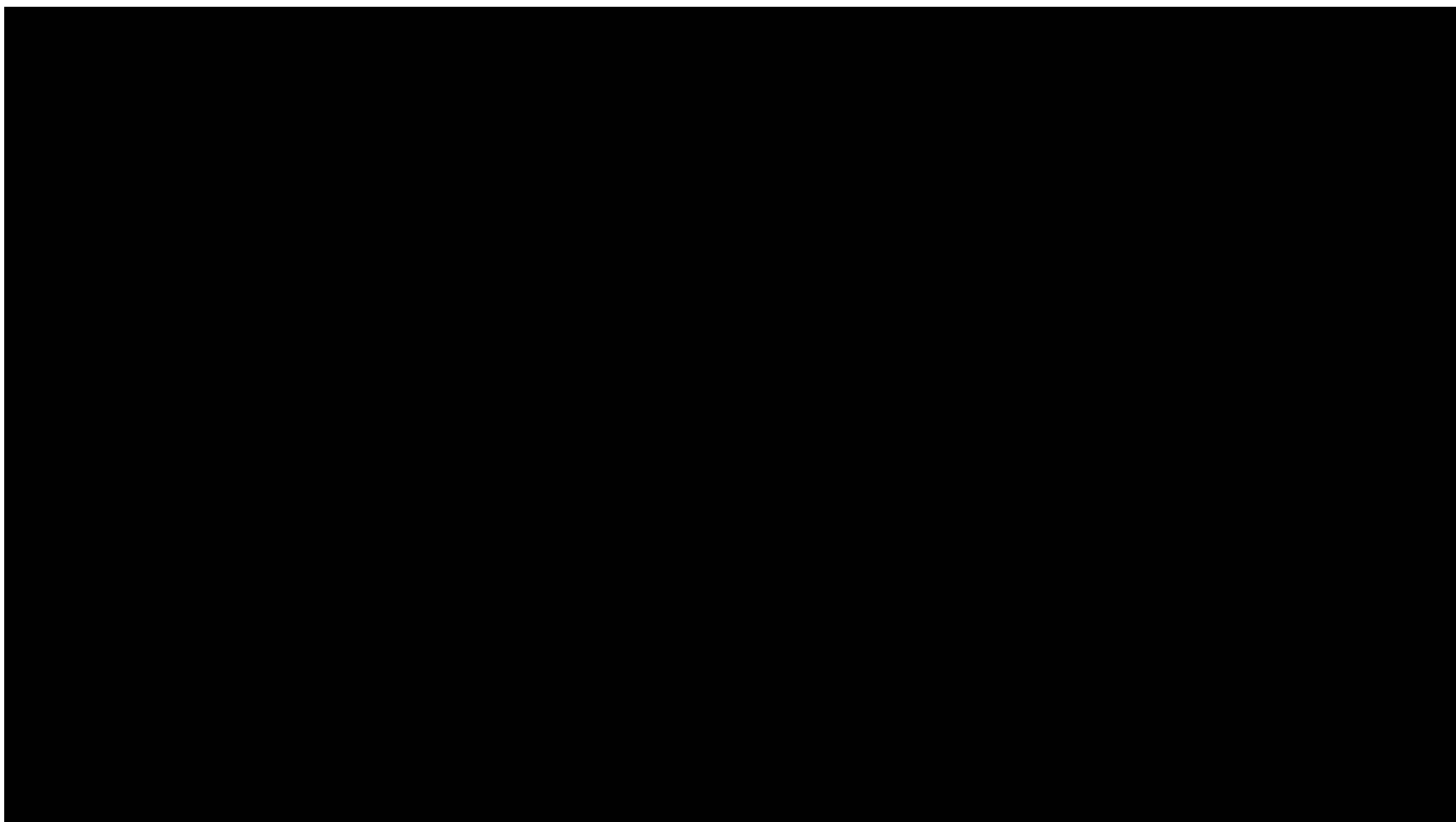


# Les extrudeuses

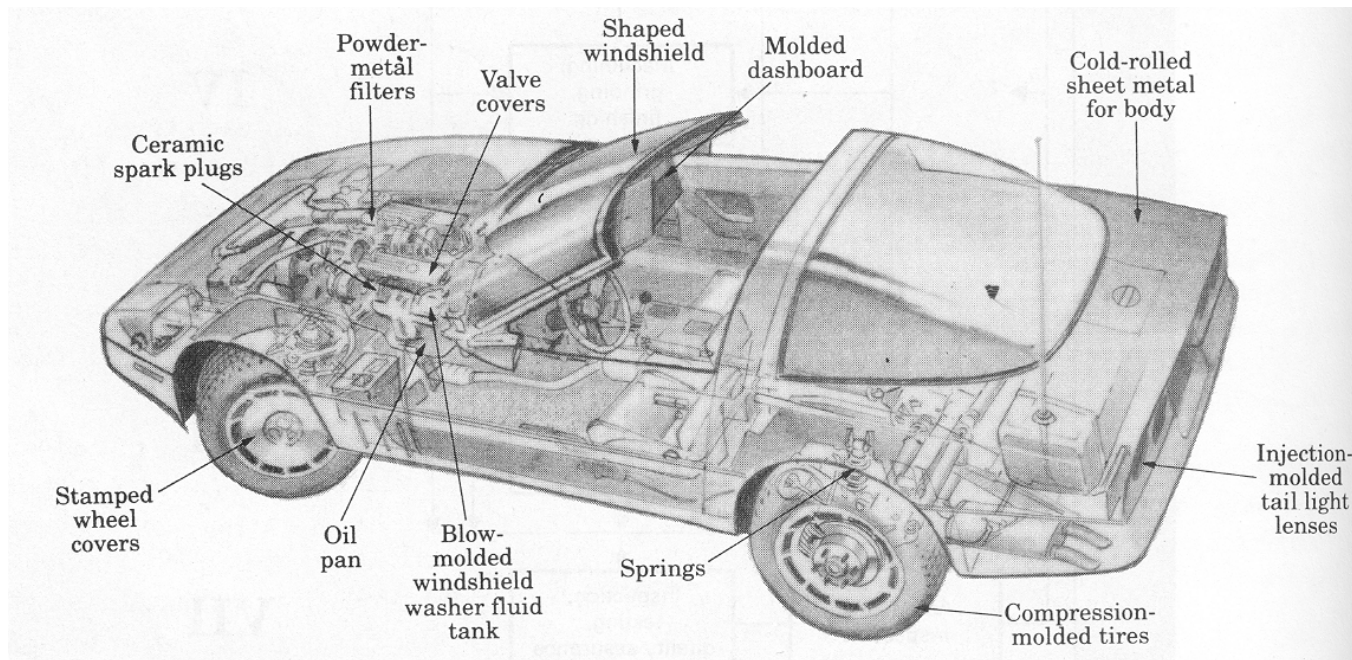


Vue générale d'une extrudeuse hydraulique de 1000 tonnes

On a construit des extrudeuses développant des efforts allant jusqu'à 14.000 tonnes.





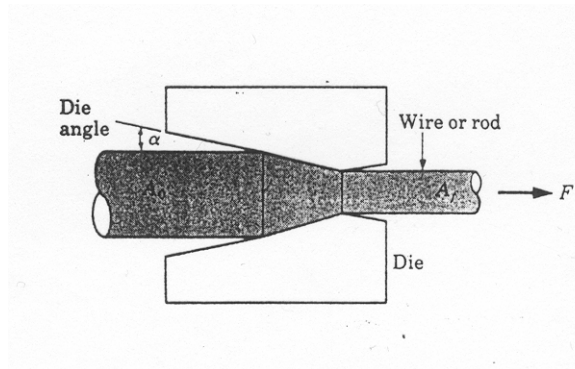


- le laminage (*rolling*),
- le forgeage (*forging*),
- l'extrusion (*extrusion*),
- l'étirage (*drawing*),
- le travail de la tôle (*sheet-forming*),
- la métallurgie des poudres (*powder metallurgy*),
- la mise en forme des plastiques et des matériaux composites

# L'étirage

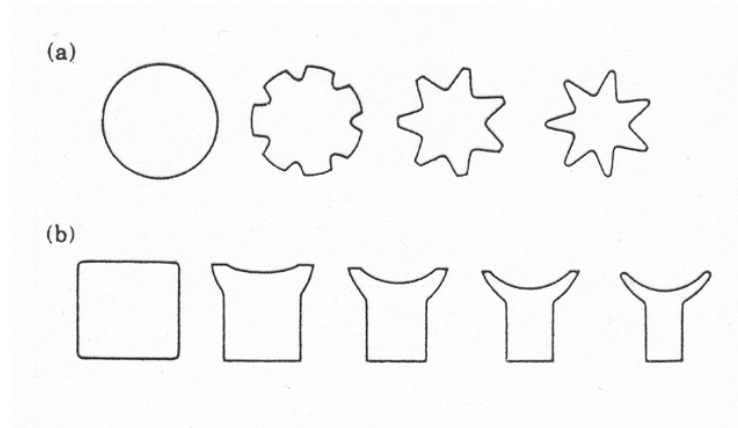
L'étirage (*drawing*) consiste à réduire ou à modifier la section transversale d'un rond, d'un fil, d'un câble ou d'un tube en la tirant à travers une filière.

Le procédé est utilisé pour produire des arbres, des pistons, des ébauches pour des rivets, des écrous, des vis...



L'étirage et ses paramètres caractéristiques

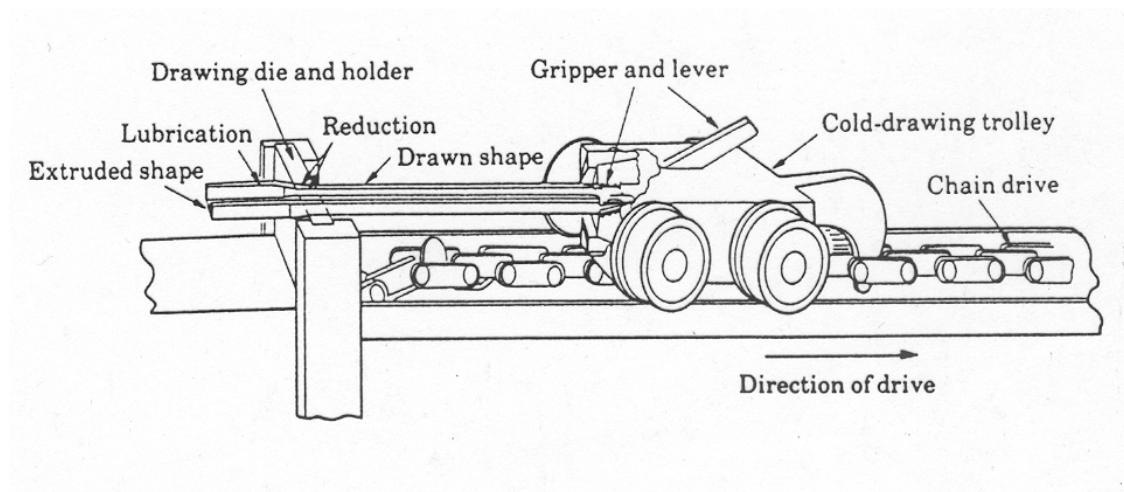
Il y a une limite à l'accroissement de la force et donc à la réduction du diamètre : elle est atteinte quand les contraintes de traction atteignent la limite élastique car la matière va s'affaisser et continuer à se déformer en dehors de la filière, ce qui est inacceptable. Idéalement, la réduction maximum de la section transversale est de 63 %



Exemples de formes de sections transversales obtenues  
par étirage

# Les machines d'étirage

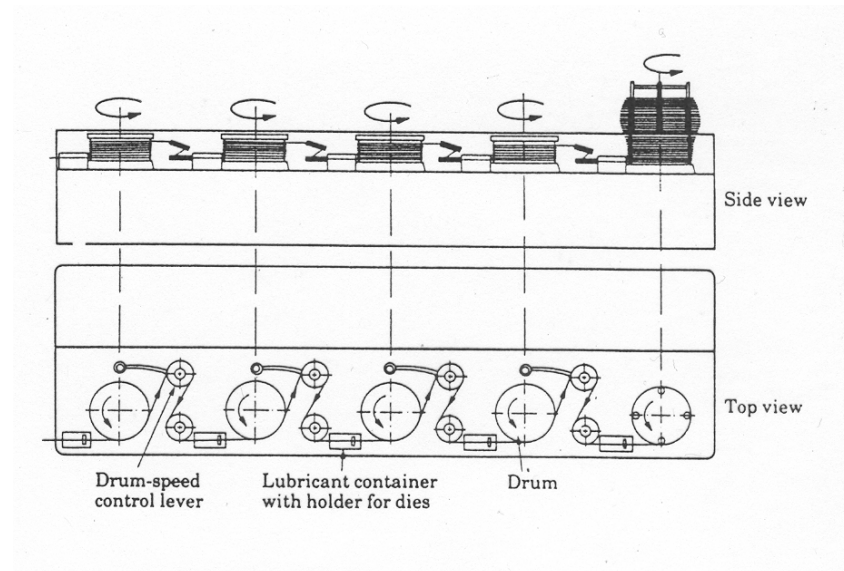
## Banc à étirer



Cet équipement est utilisé pour l'étirage de ronds de diamètre supérieur à 20 mm. La longueur de ces ronds peut atteindre 30 m. La capacité de ces machines atteint 1,3 MN, leur vitesse varie de 0,01 m/s à 0,1 m/s.

# Banc à tréfiler

Des ronds de très grande longueur (plusieurs kilomètres) et de sections plus petites (généralement  $< 13 \text{ mm}$ ) sont étirés à l'aide d'un tambour tournant.



## Machine de tréfilage



# Le travail des tôles

- Le pliage
- **L'emboutissage**
- Le cisailage
- Le poinçonnage

# Le travail des tôles

- Le pliage
- L'emboutissage
- Le cisailage
- Le poinçonnage

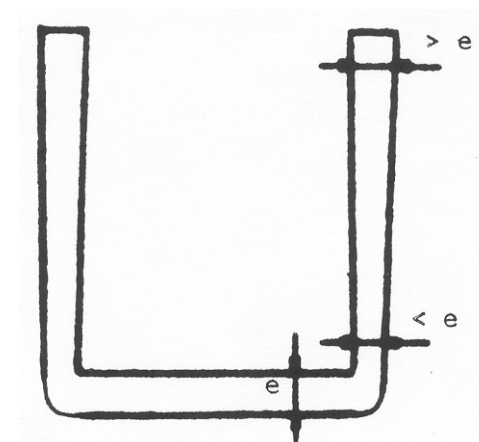
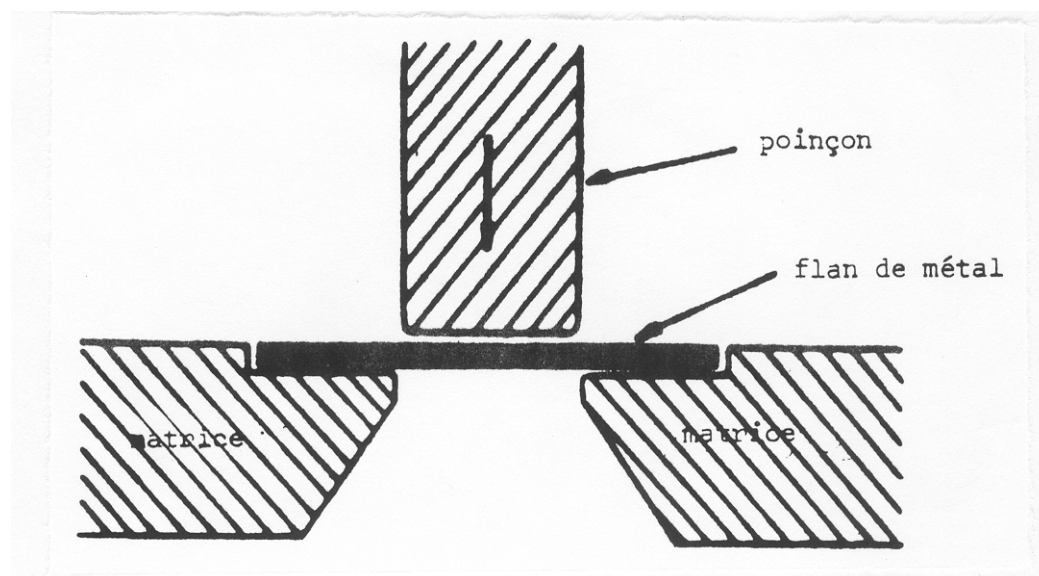
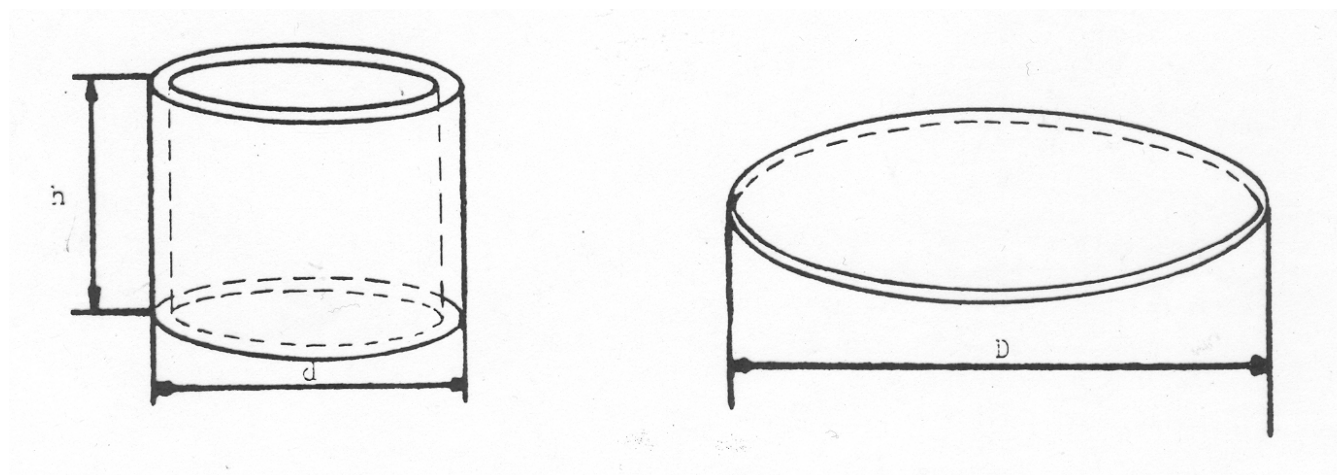


# L'emboutissage

L'emboutissage est l'opération qui consiste à donner à une tôle, la forme d'une surface non développable.







Degré d'écrouissage  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = (S_i - S_f) / S_f$$

$S_i$  = section initiale  
 $S_f$  = section finale

Le degré d'écrouissage  $\varepsilon$  est propre à chaque métal.

Dans le cas de la cuvette :

$$S_i = \pi D e$$
$$S_f = \pi d e'$$

On a donc :  $\varepsilon = (\pi D e - \pi d e') / \pi d e'$

Si l'on considère les variations d'épaisseur négligeables, on a :  $e \approx e'$

Donc,  $\varepsilon = (D - d) / d = D / d - 1$

En pratique, il est plus facile de travailler avec le coefficient d'emboutissage  $m$  :  
 $m = d / D = 1 / (1 + \varepsilon)$

Le flan est donc tel que :  $\pi D^2 / 4 = \pi d^2 / 4 + \pi d h$

D'où  $D = \sqrt{d^2 + 4 d h}$

# Emboutissages successifs

On a pour la

$$\begin{array}{ll} 1^{\text{ère}} \text{ passe :} & \varepsilon_1 = (S - S_1)/S_1 \\ 2^{\text{ème}} \text{ passe :} & \varepsilon_2 = (S_1 - S_2)/S_2 \\ n^{\text{e}} \text{ passe :} & \varepsilon_n = (S_{n-1} - S_n)/S_n \end{array}$$

$$\varepsilon_1 = (S - S_1)/S_1 = S/S_1 - 1 \rightarrow S = S_1 (1 + \varepsilon_1)$$

On a donc :

$$\begin{array}{l} S = S_1 (1 + \varepsilon_1) \\ S_1 = S_2 (1 + \varepsilon_2) \\ \dots \\ S_{n-1} = S_n (1 + \varepsilon_n) \end{array}$$

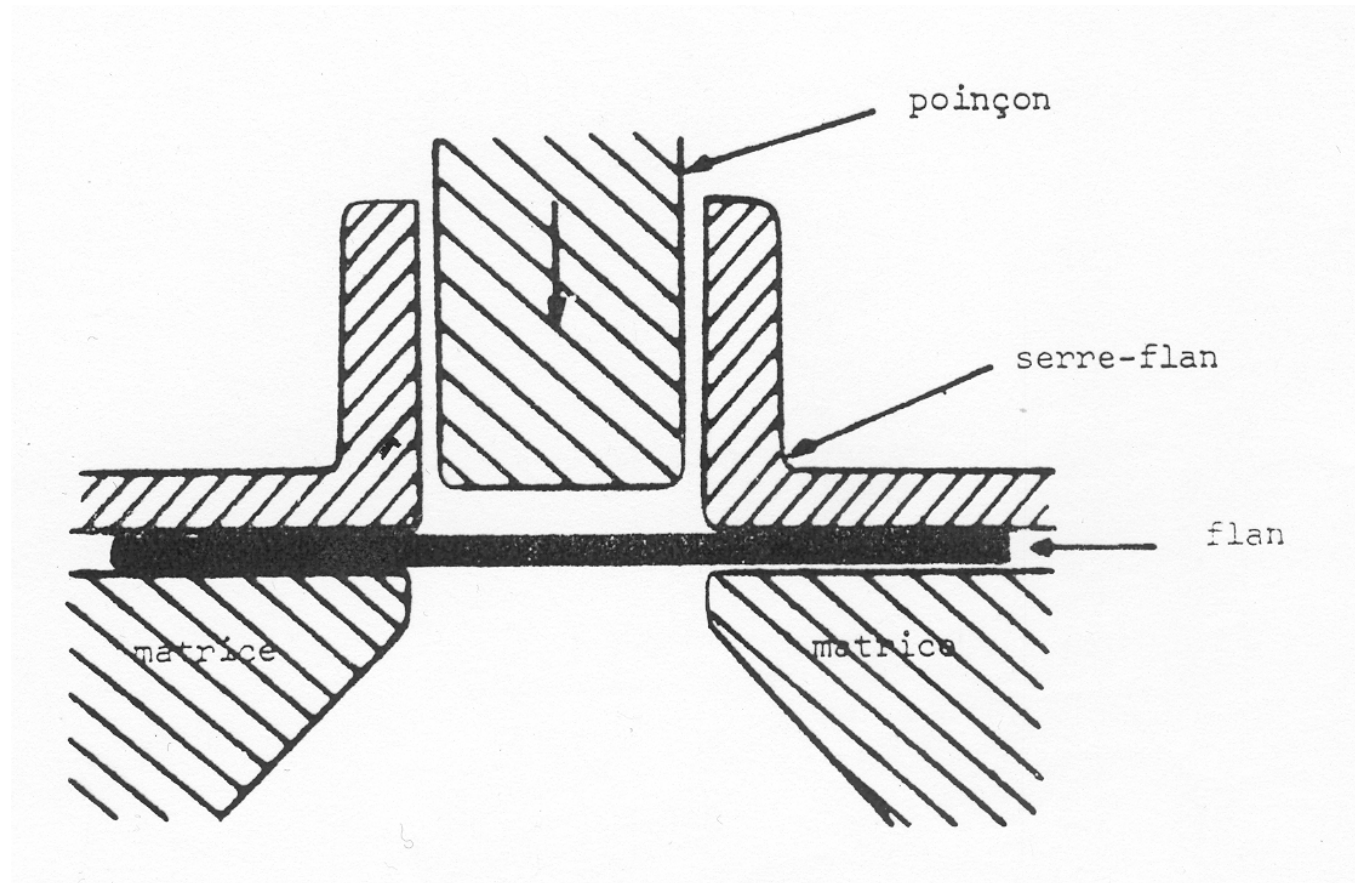
D'où :

$$\begin{array}{l} S = S_n (1 + \varepsilon_1) (1 + \varepsilon_2) \dots (1 + \varepsilon_n) \\ S = S_n (1 + \varepsilon)^n \text{ où } \varepsilon \text{ n'est pas constant.} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} 1^{\text{ère}} \text{ passe :} & 0,6 \text{ (acier inoxydable)} < \varepsilon < 0,9 \text{ (laiton)} \\ 2^{\text{ème}} \text{ passe (sauf recuit) et passes ultérieures :} & 0,25 < \varepsilon < 0,4 \end{array}$$

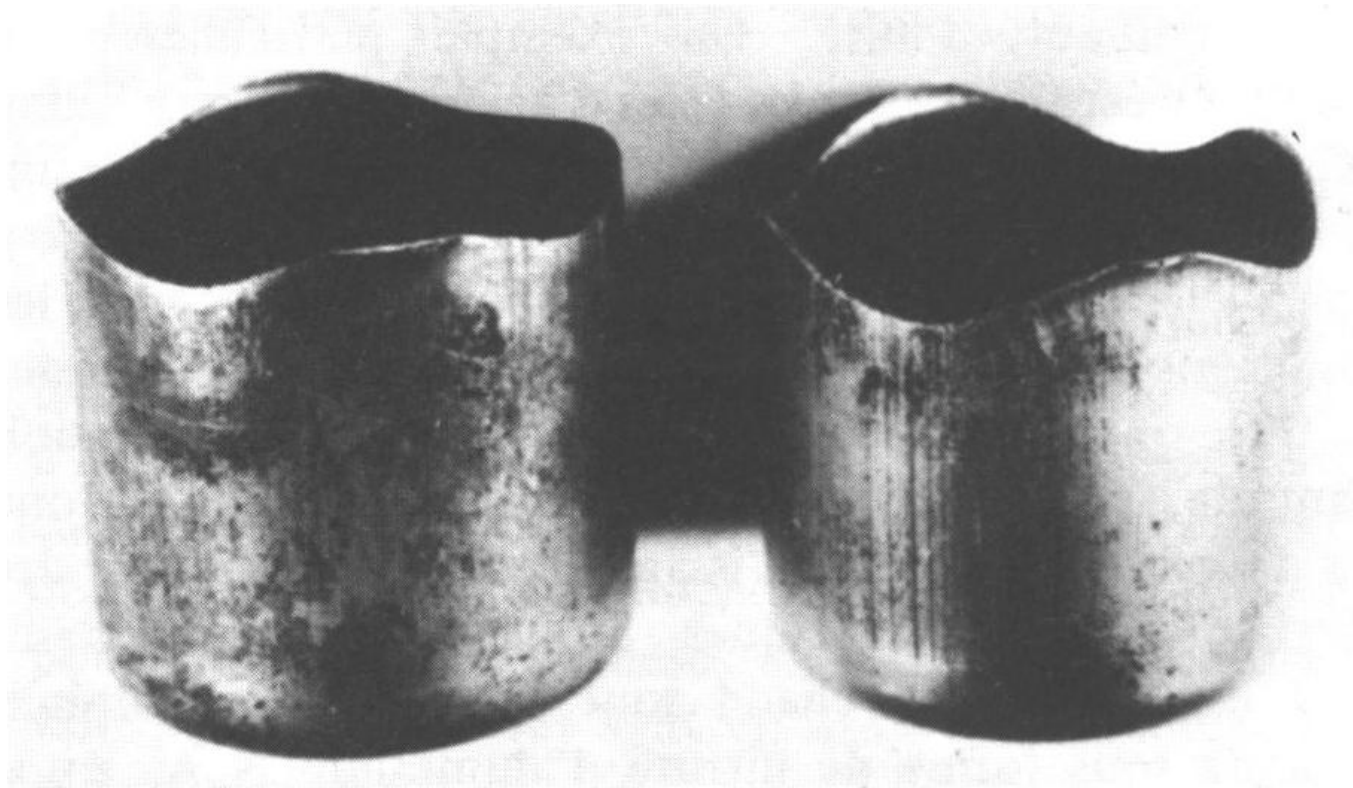


# Eviter la formation de plis



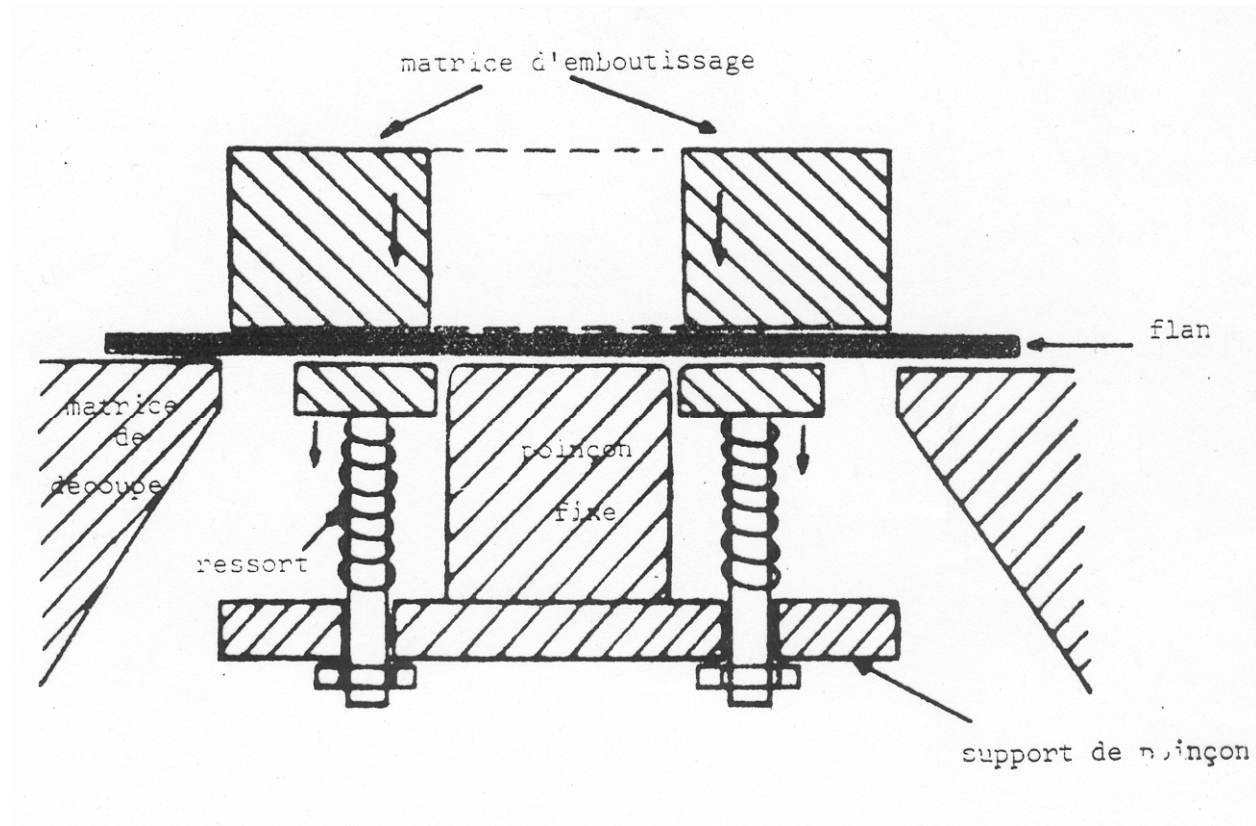
Serre-flan

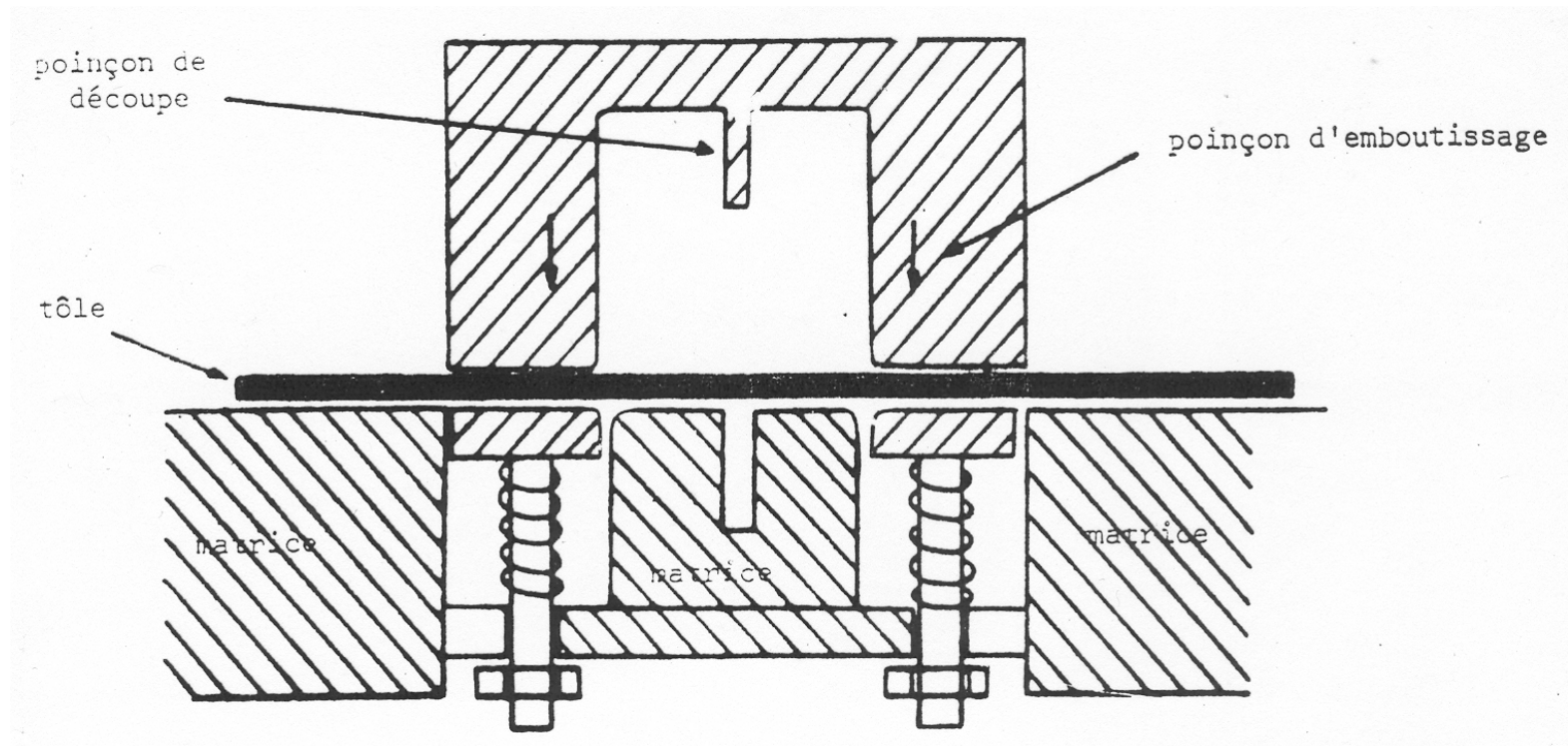
# Effet de l'anisotropie du matériau



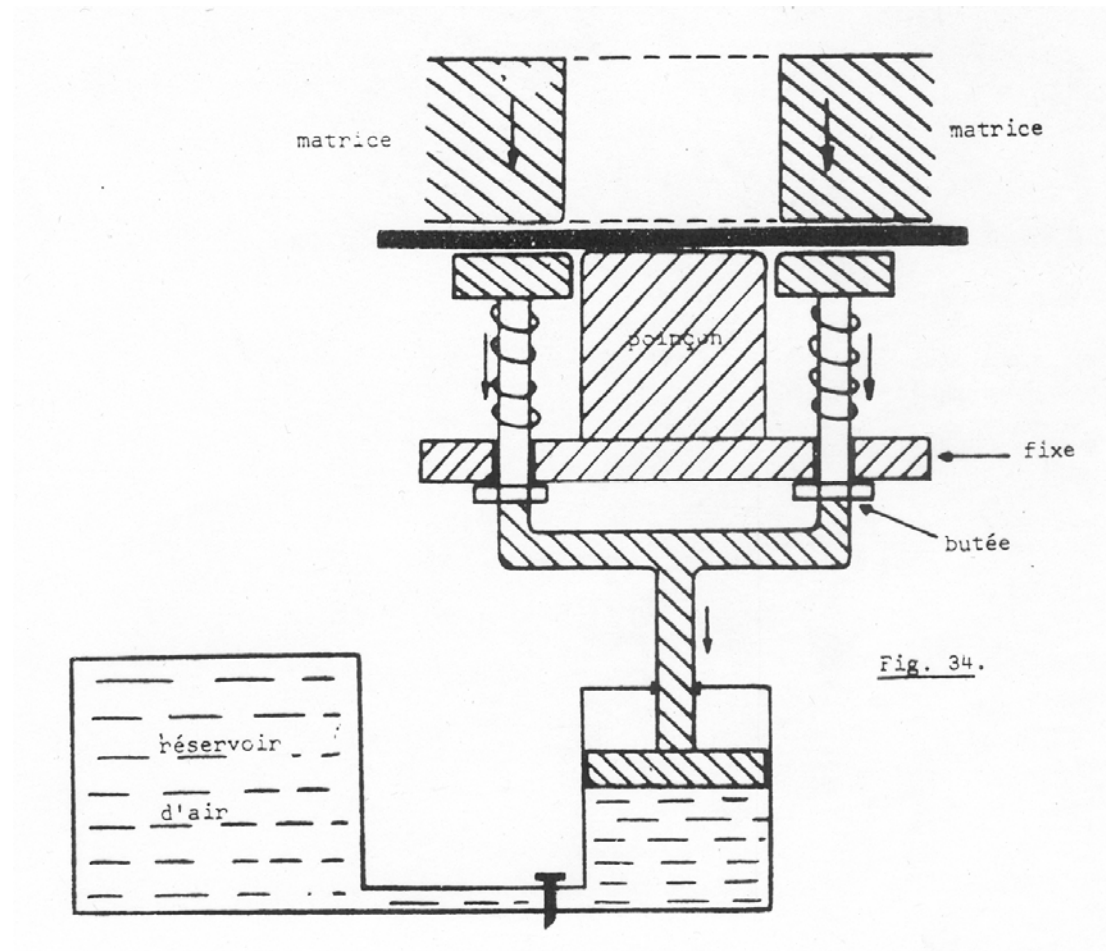


# Serre-flan à ressorts

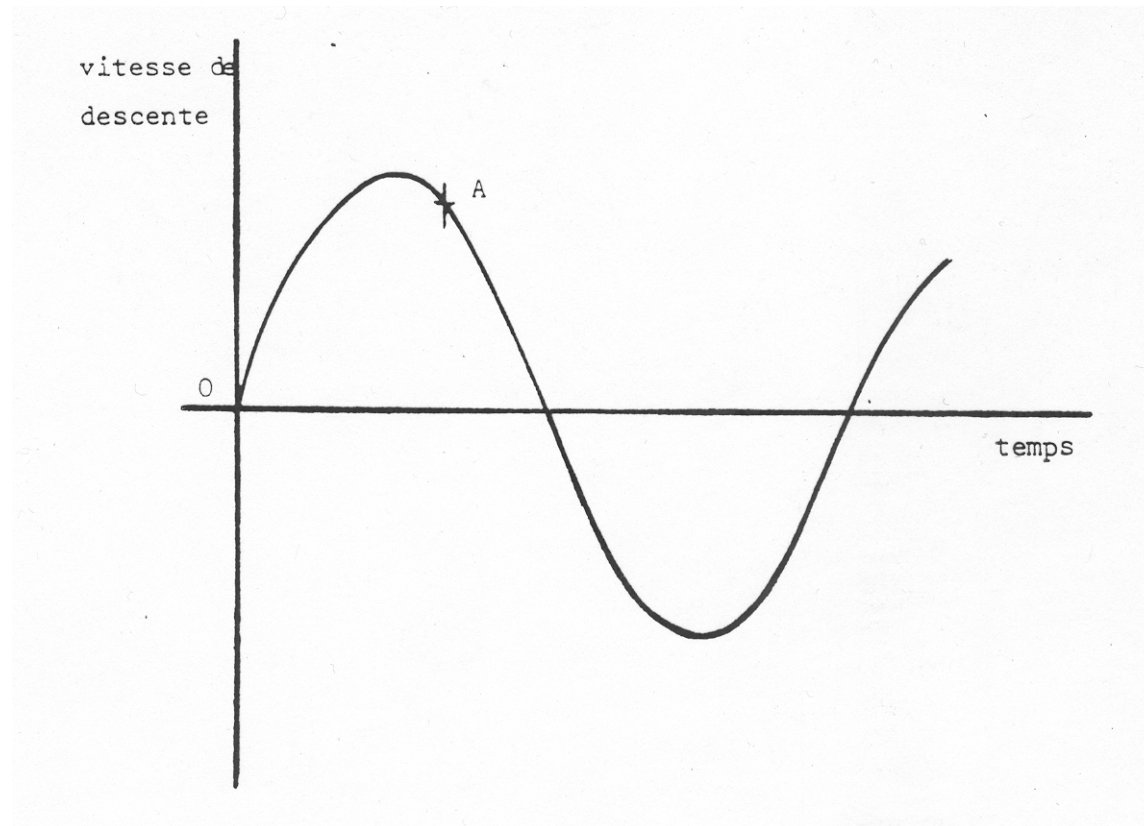




# Serre-flan pneumatique



# Vitesse de la presse en fonction du temps



# A quoi sert un recuit?

Après déformation à froid (par exemple le laminage à froid), un métal est fortement écroui: il présente une grande résistance, mais n'est pas ductile Il est fragile.

Ceci est dû aux défauts (dislocations) qui ont été générées lors de la déformation.

Si l'on élève la température (typiquement  $T_f/3$ ), le retour à l'équilibre thermodynamique passera par la création de nouveaux grains (cristaux). On parle de recristallisation

