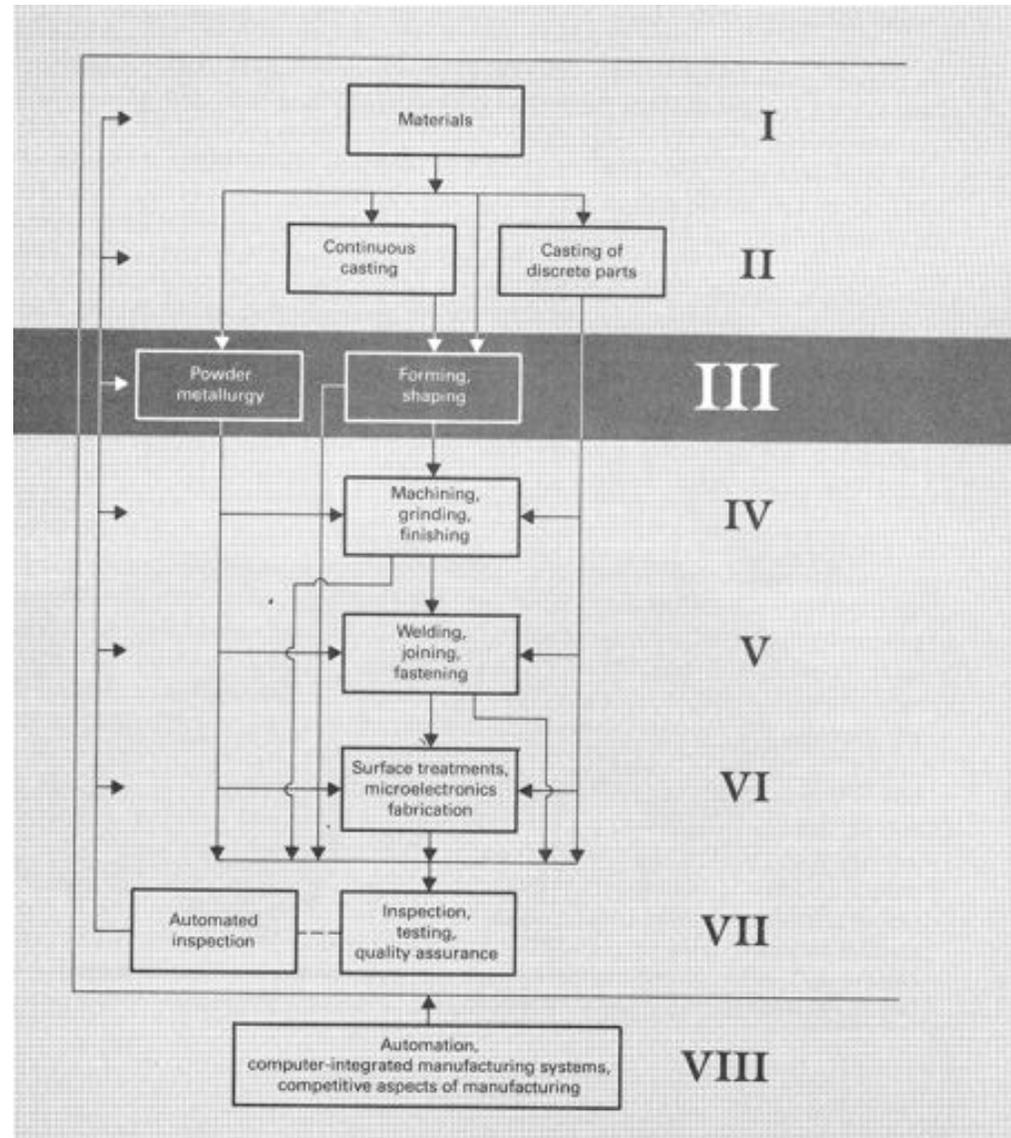
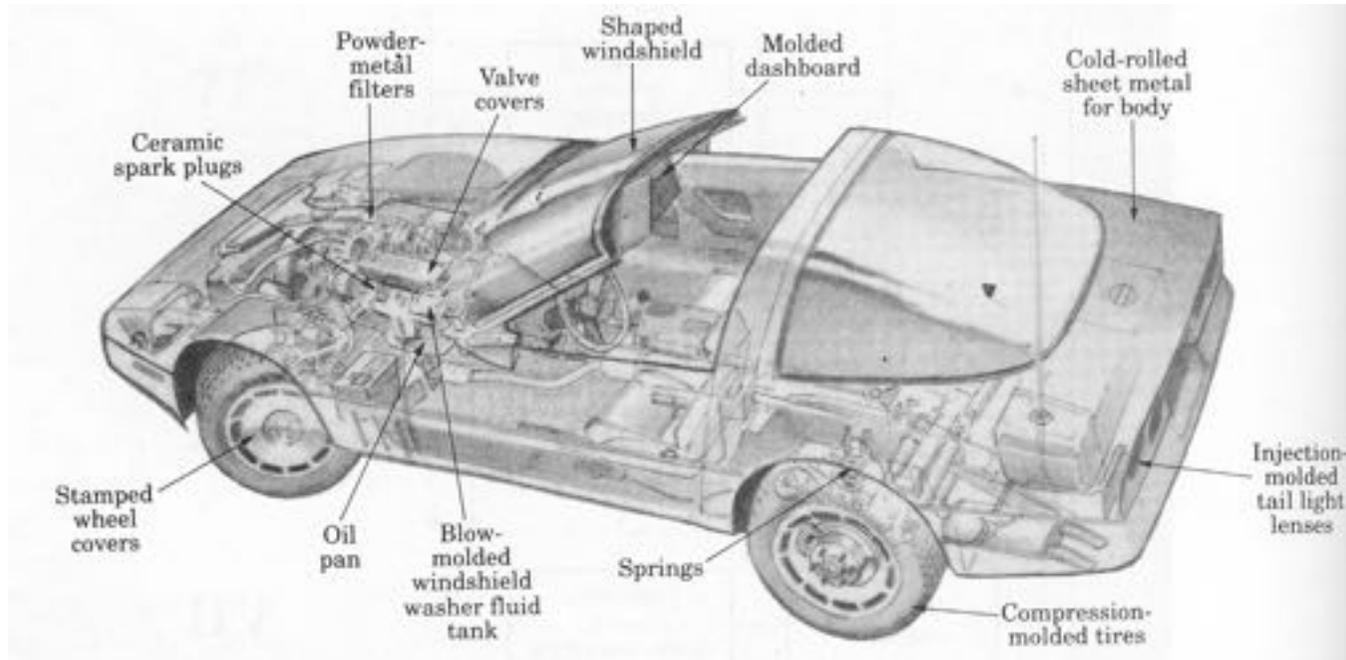


Partie II : la mise en forme des matériaux



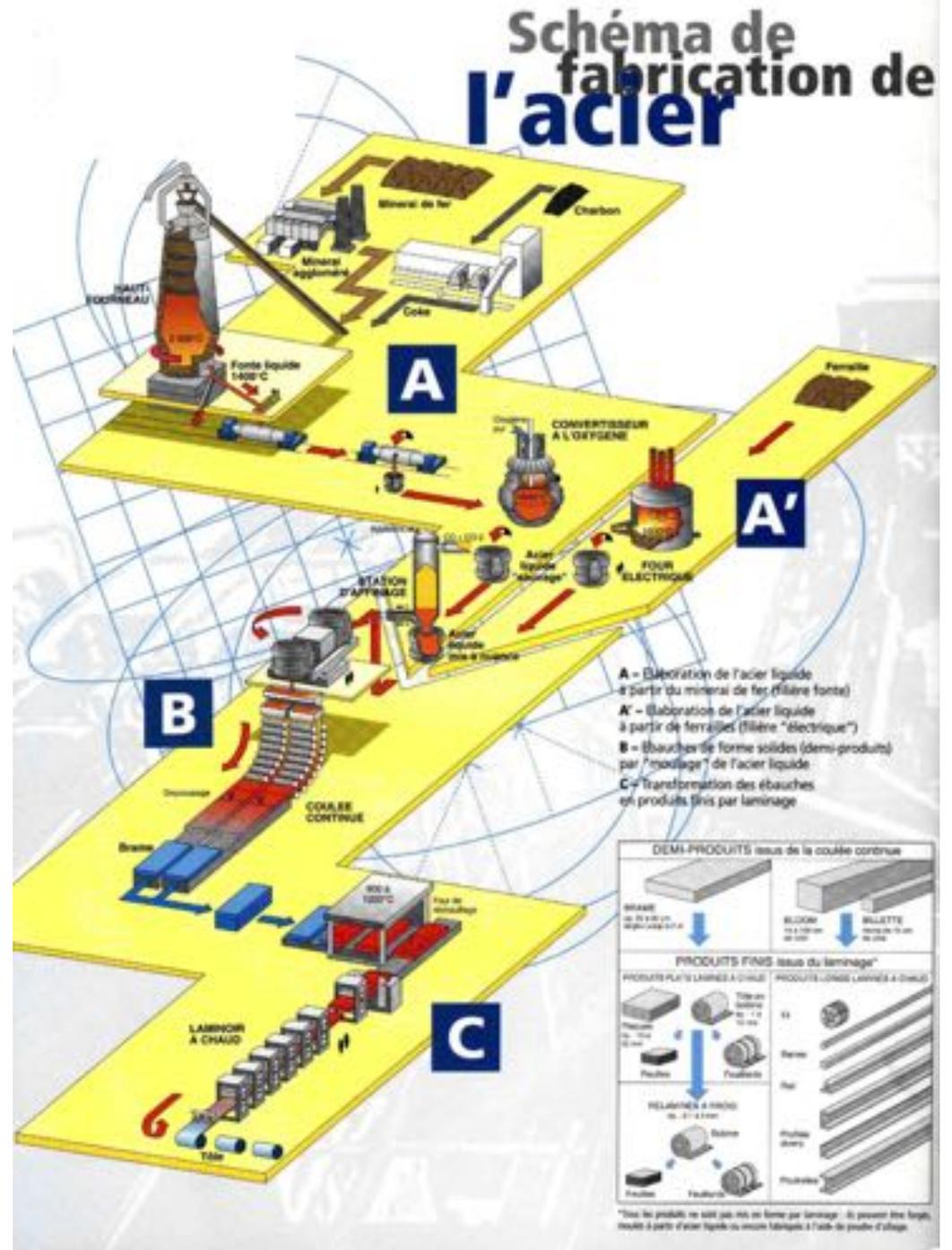
Plan Mise en forme

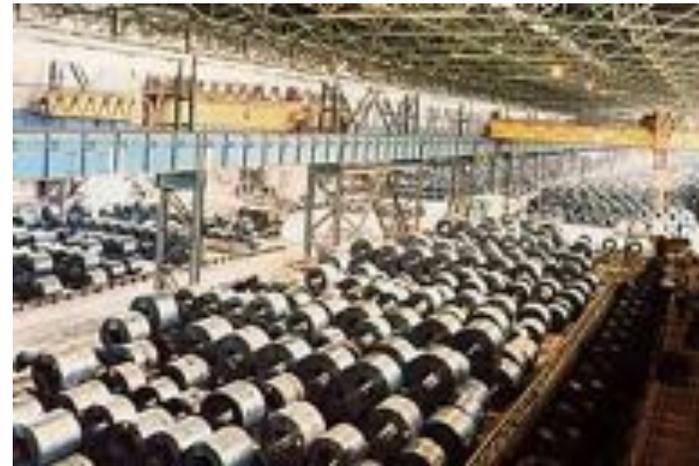
1. Le laminage
2. Le forgeage
3. L'extrusion
4. L'emboutissage
5. Traitements Thermiques: le recuit



- 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

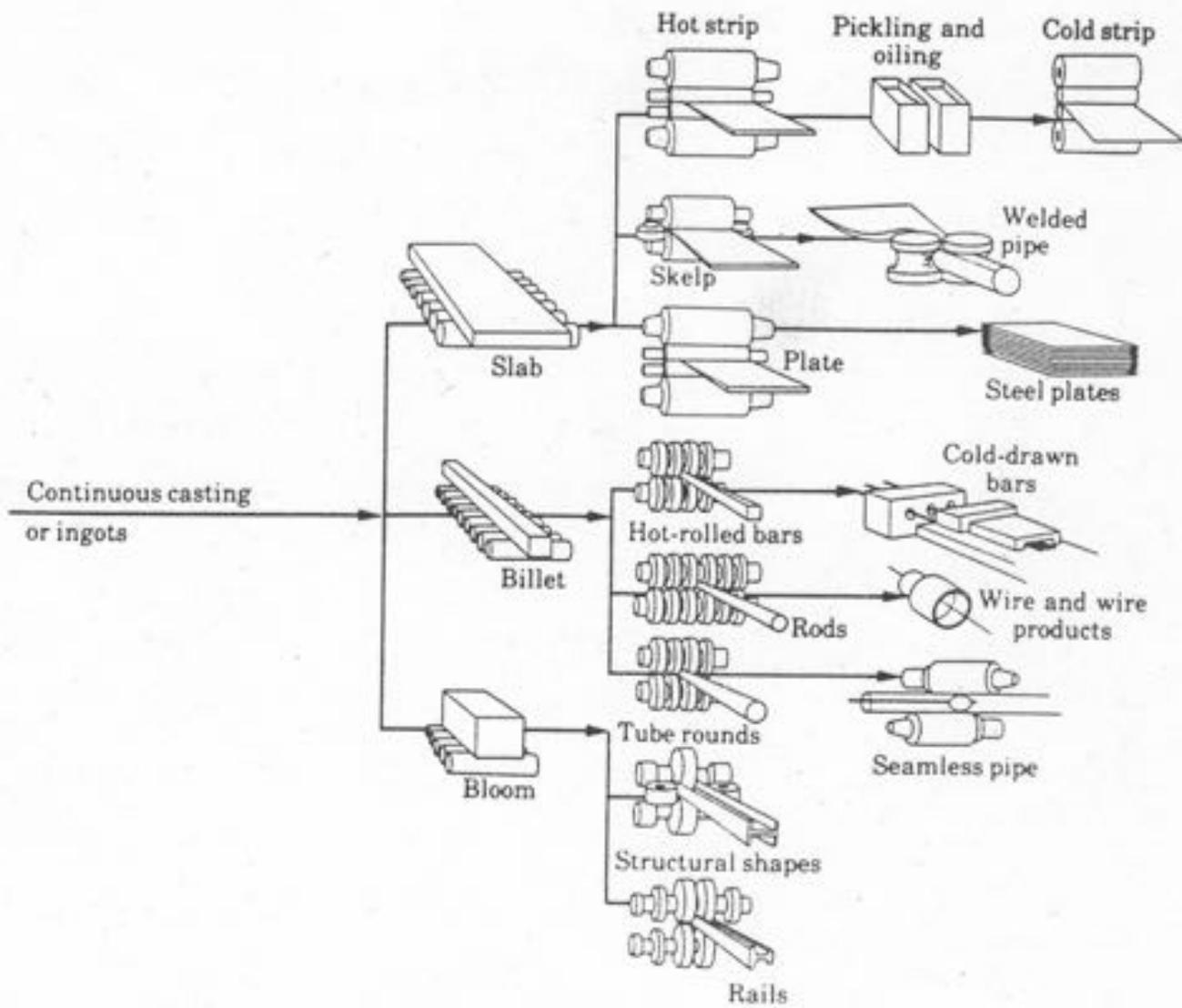
On distingue :

- 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).

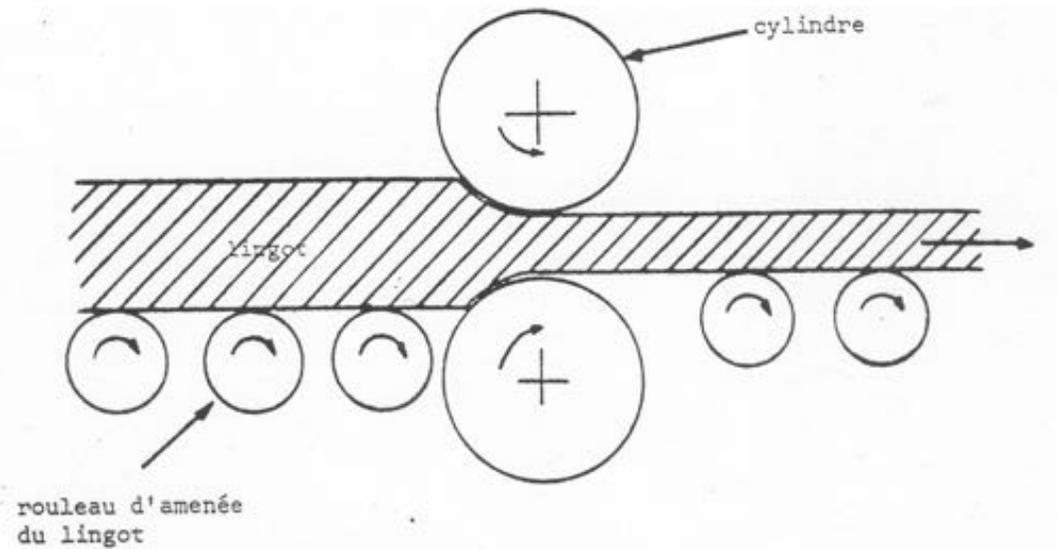
Par ce procédé, on obtient :

- des tôles :
 - fines ≤ 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.

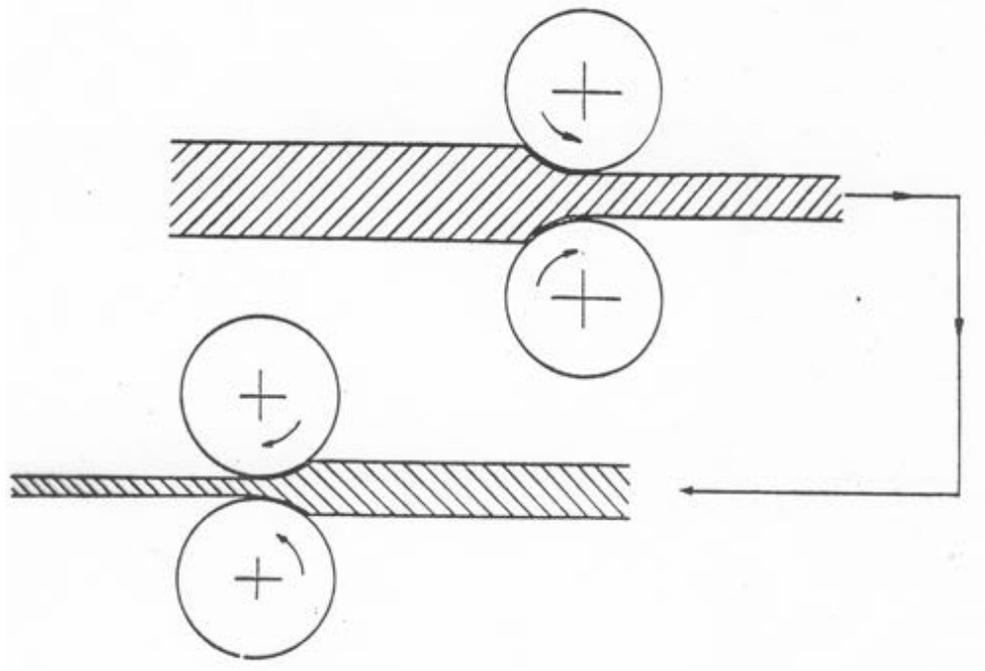
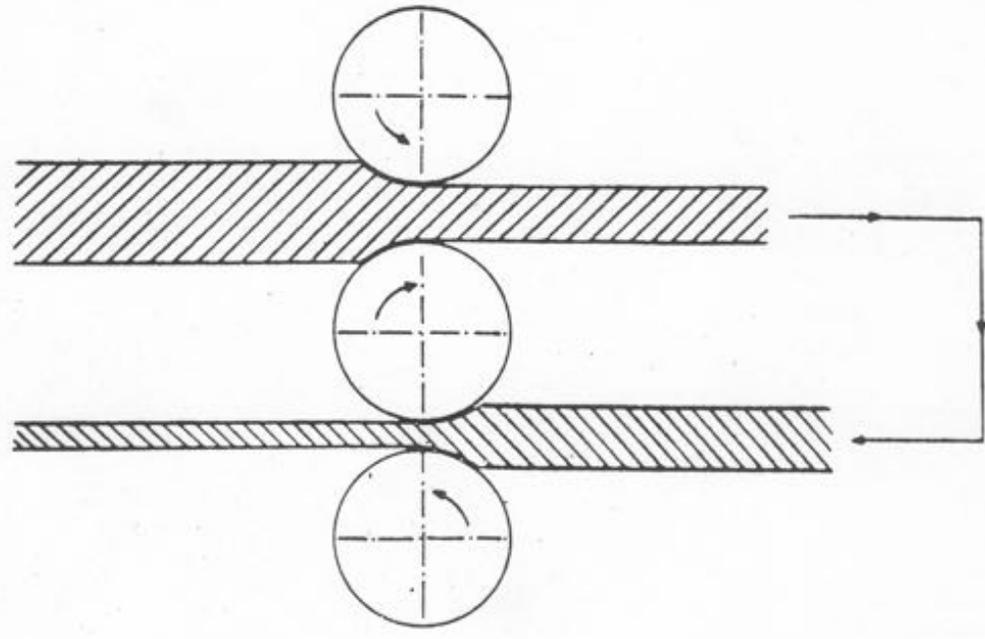


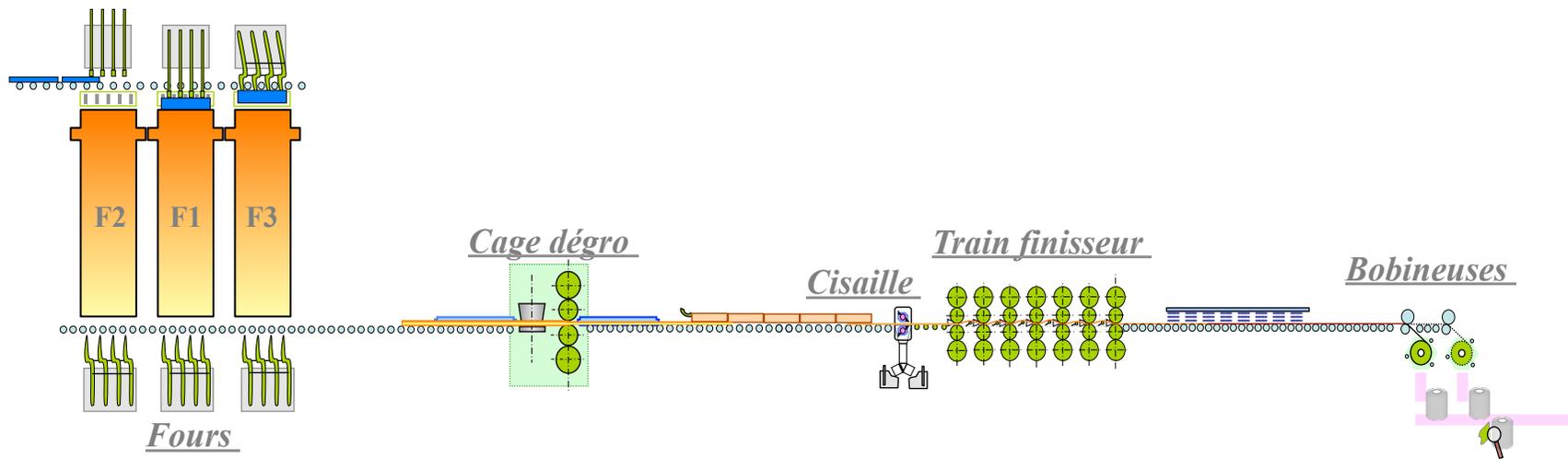
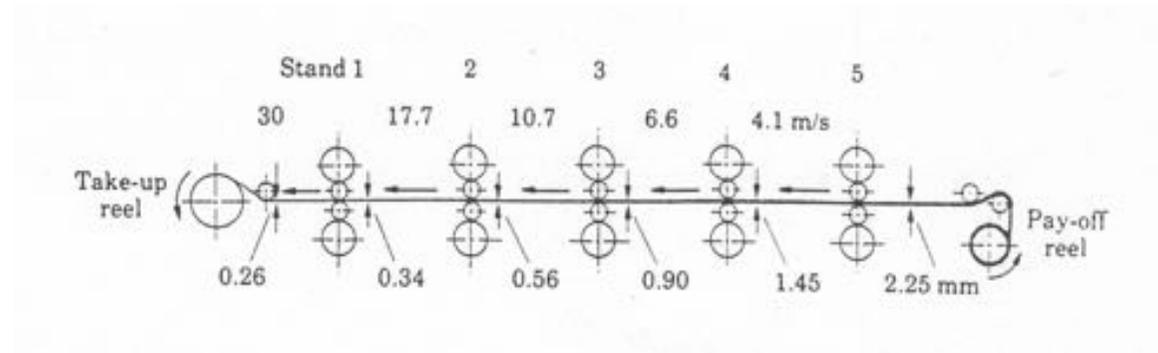
- Les matériaux sont généralement préchauffés aux températures suivantes:
 - 450 °C pour les alliages d'aluminium
 - jusque 1250 °C pour les aciers et leurs alliages
 - jusque 1650 °C pour les alliages réfractaires
- Lingot de section rectangulaire :
 - brame : largeur de 200 à 500 mm
épaisseur de 40 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.

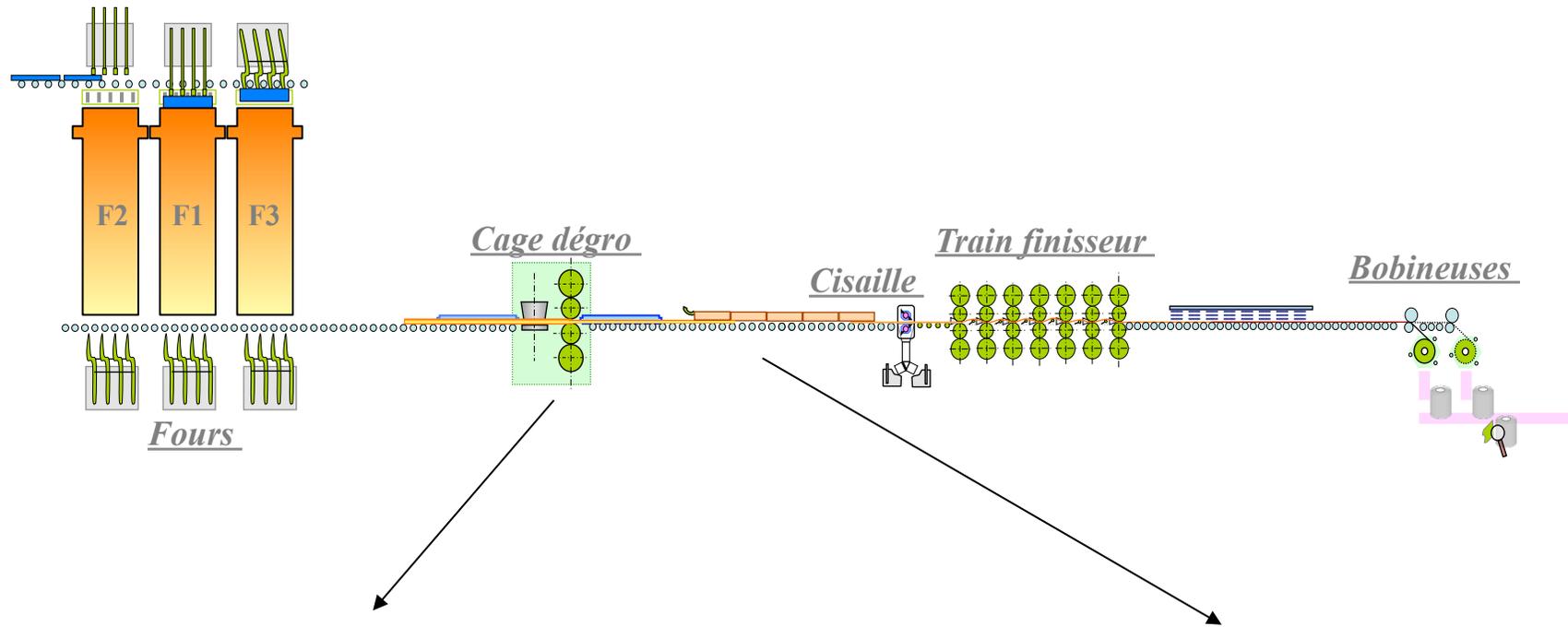
L'opération de laminage doit être rapide, car le métal se refroidit. Cela nécessite alors de grandes puissances, jusqu'à plusieurs milliers de kilowatts.

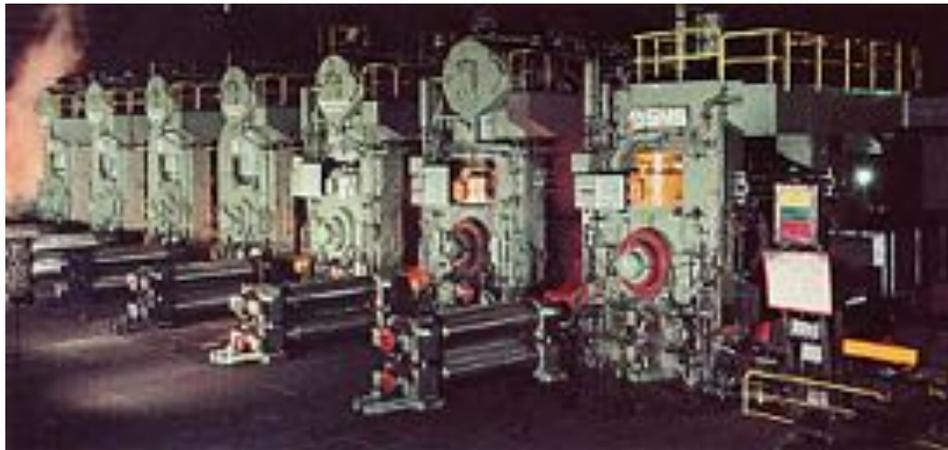
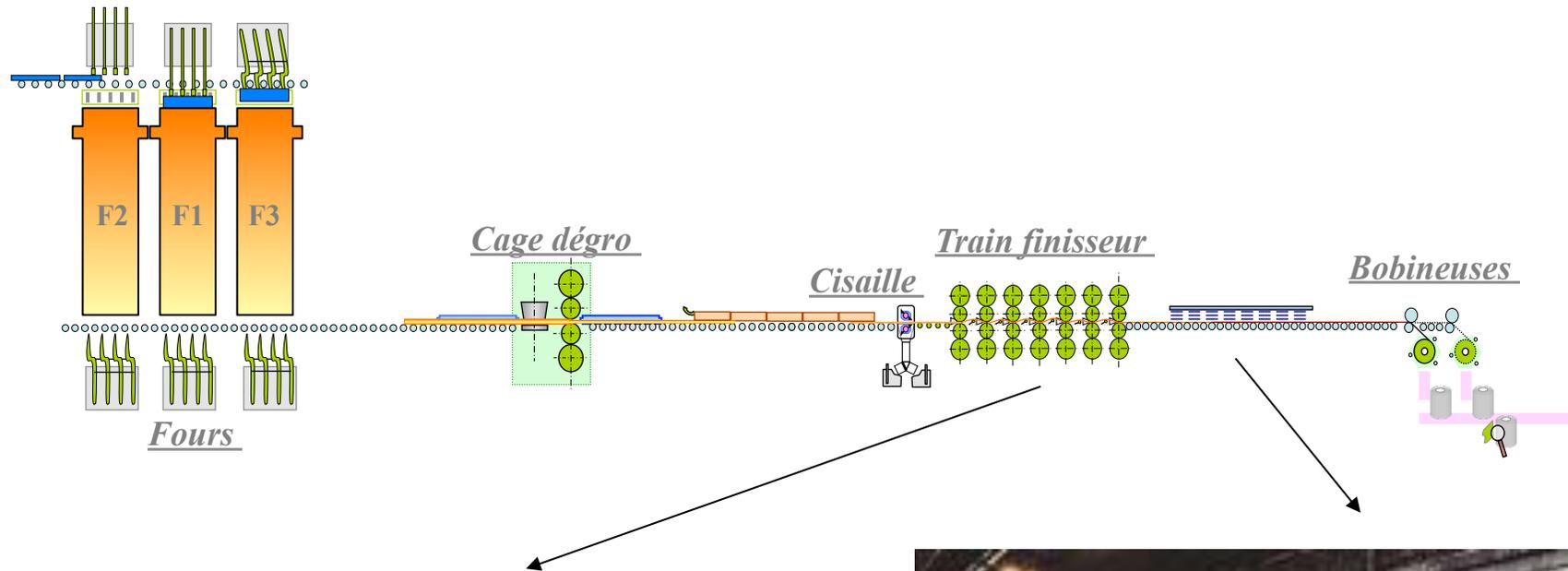


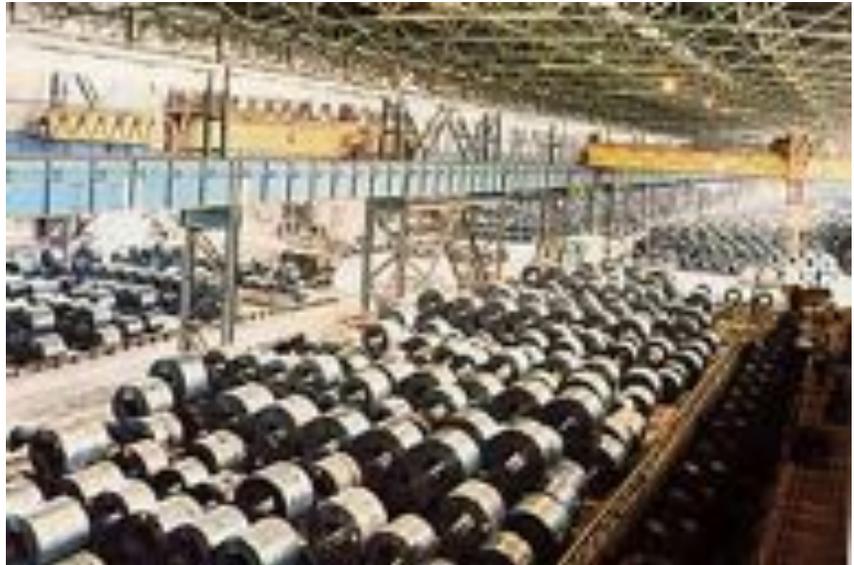
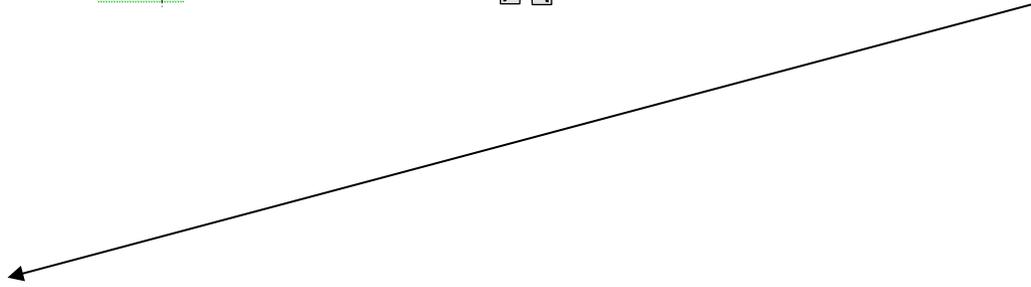
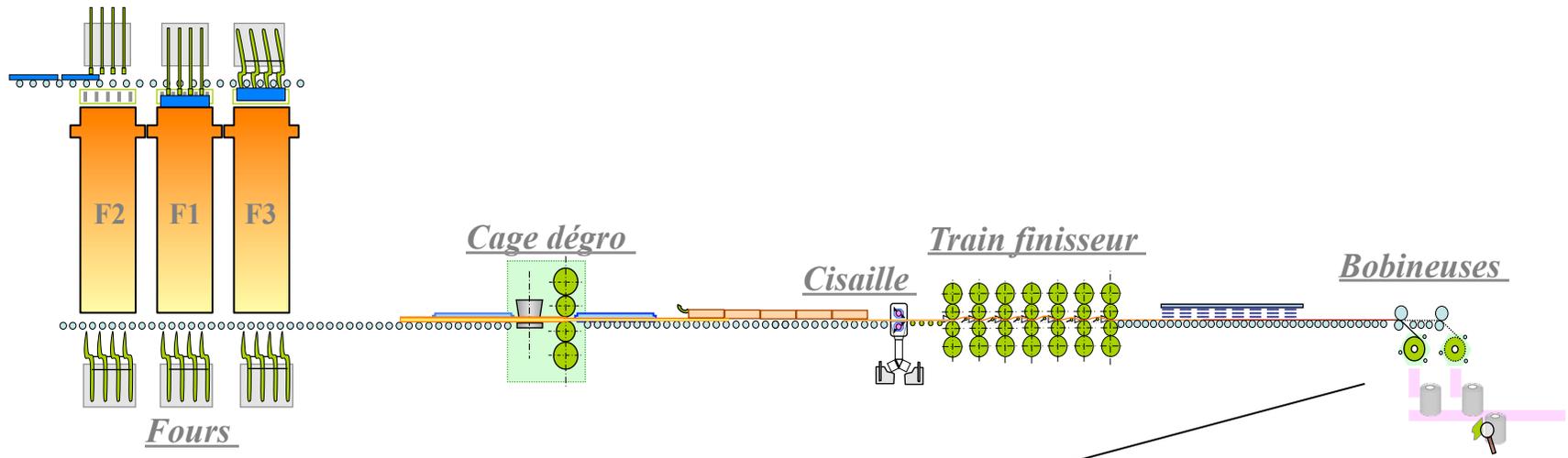
- Plusieurs duos en série.
- Faire repasser le lingot plusieurs fois dans le même laminoir.
 - Le duo réversible
 - Le trio
 - Le double duo



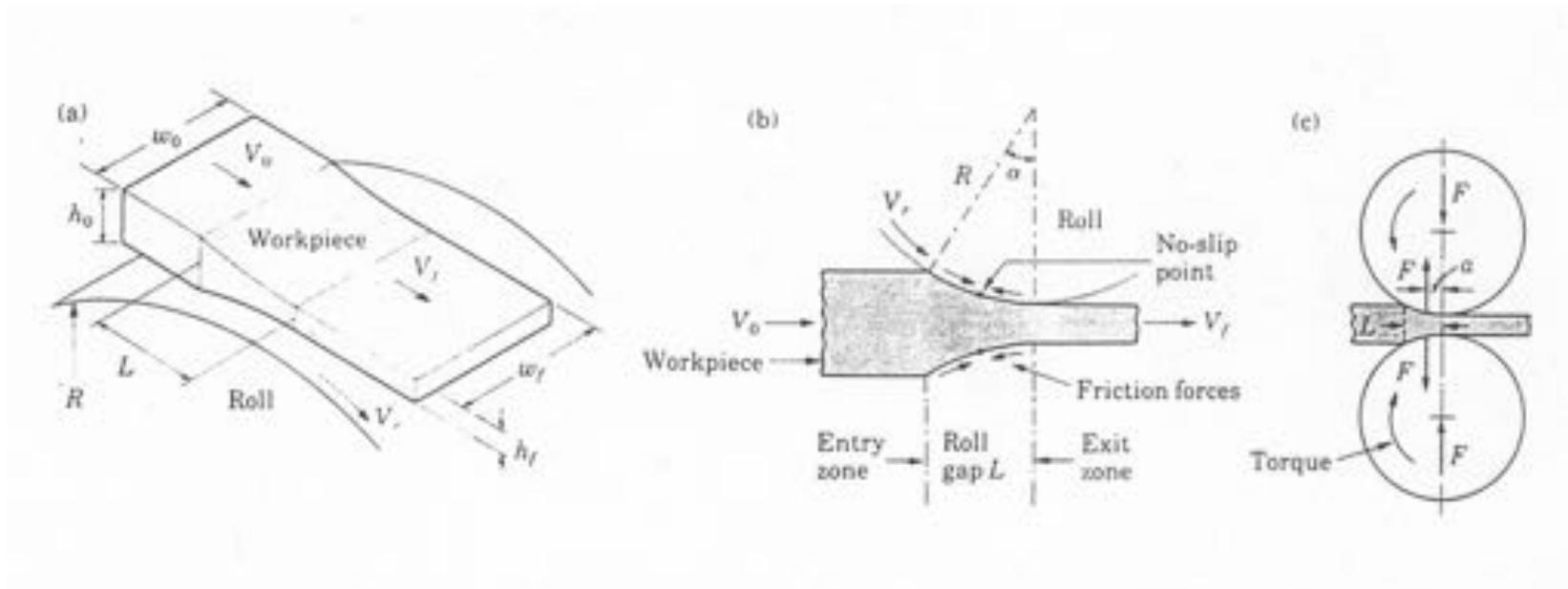




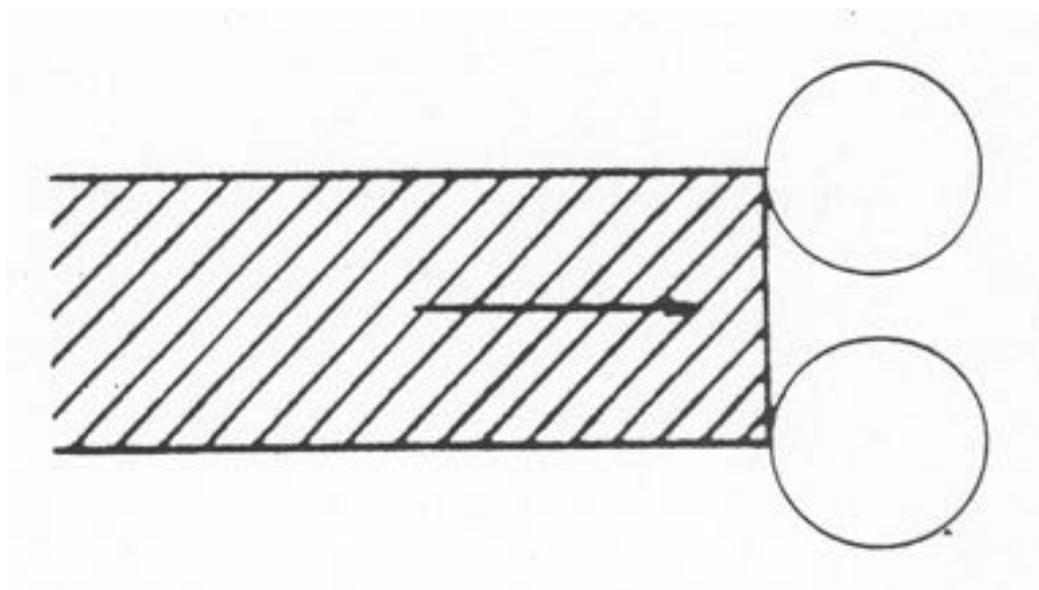




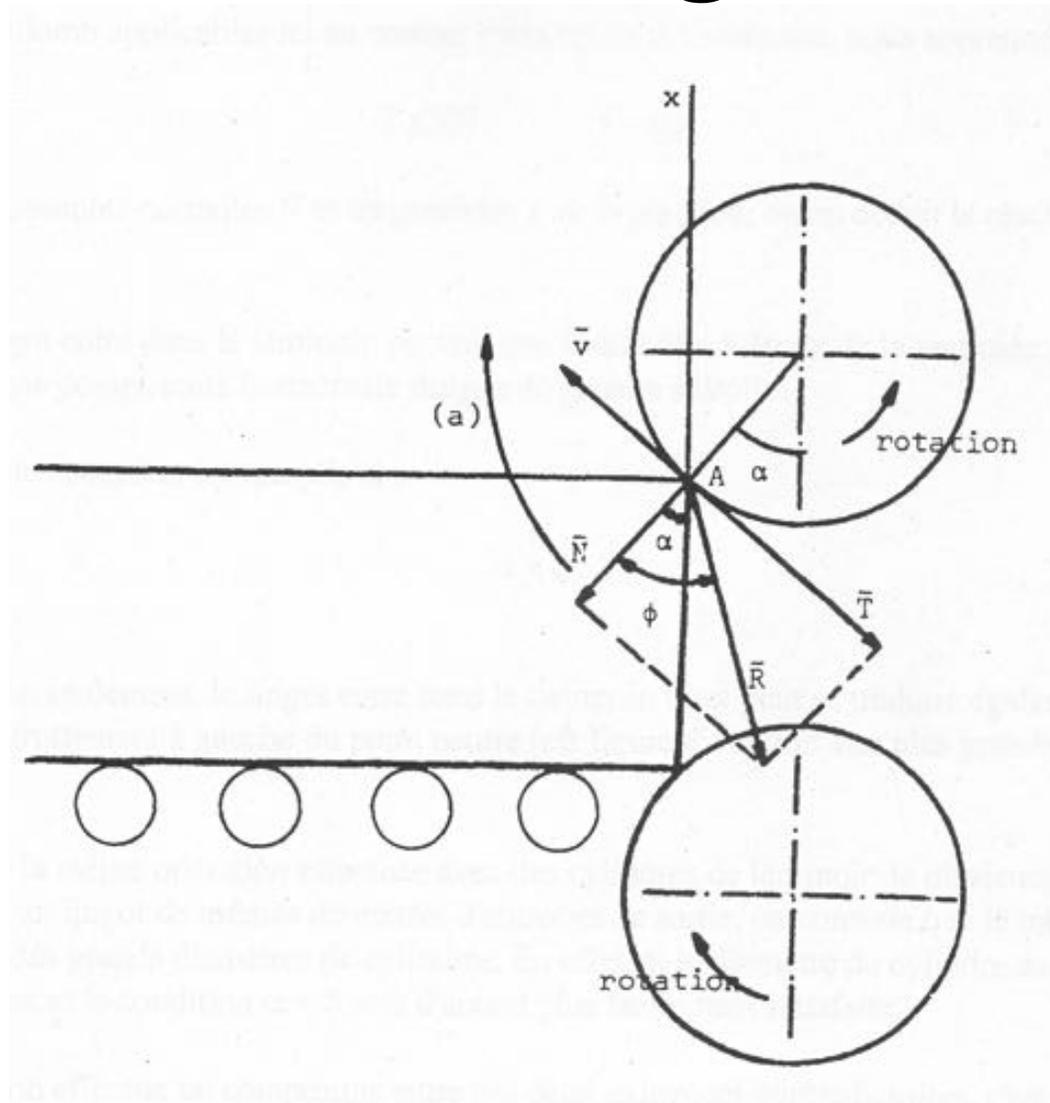
Le laminage longitudinal ou parallèle (et plan)



Entrée du lingot dans le laminoir



Entrée du lingot dans le laminoir



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

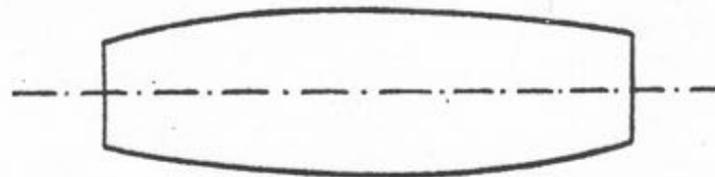
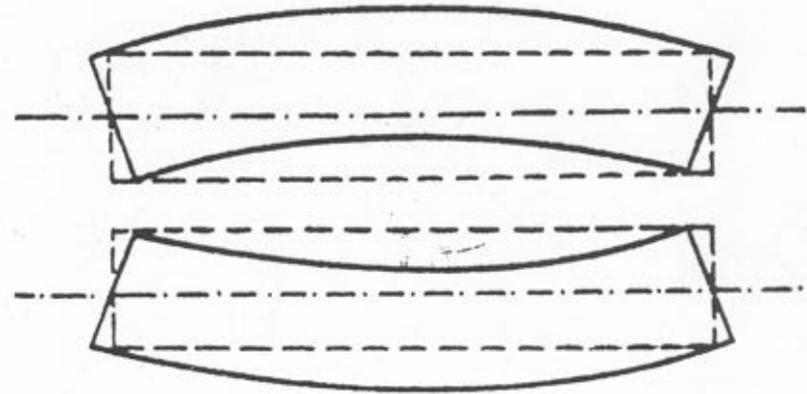
$$\text{Or } T = \mu N$$

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

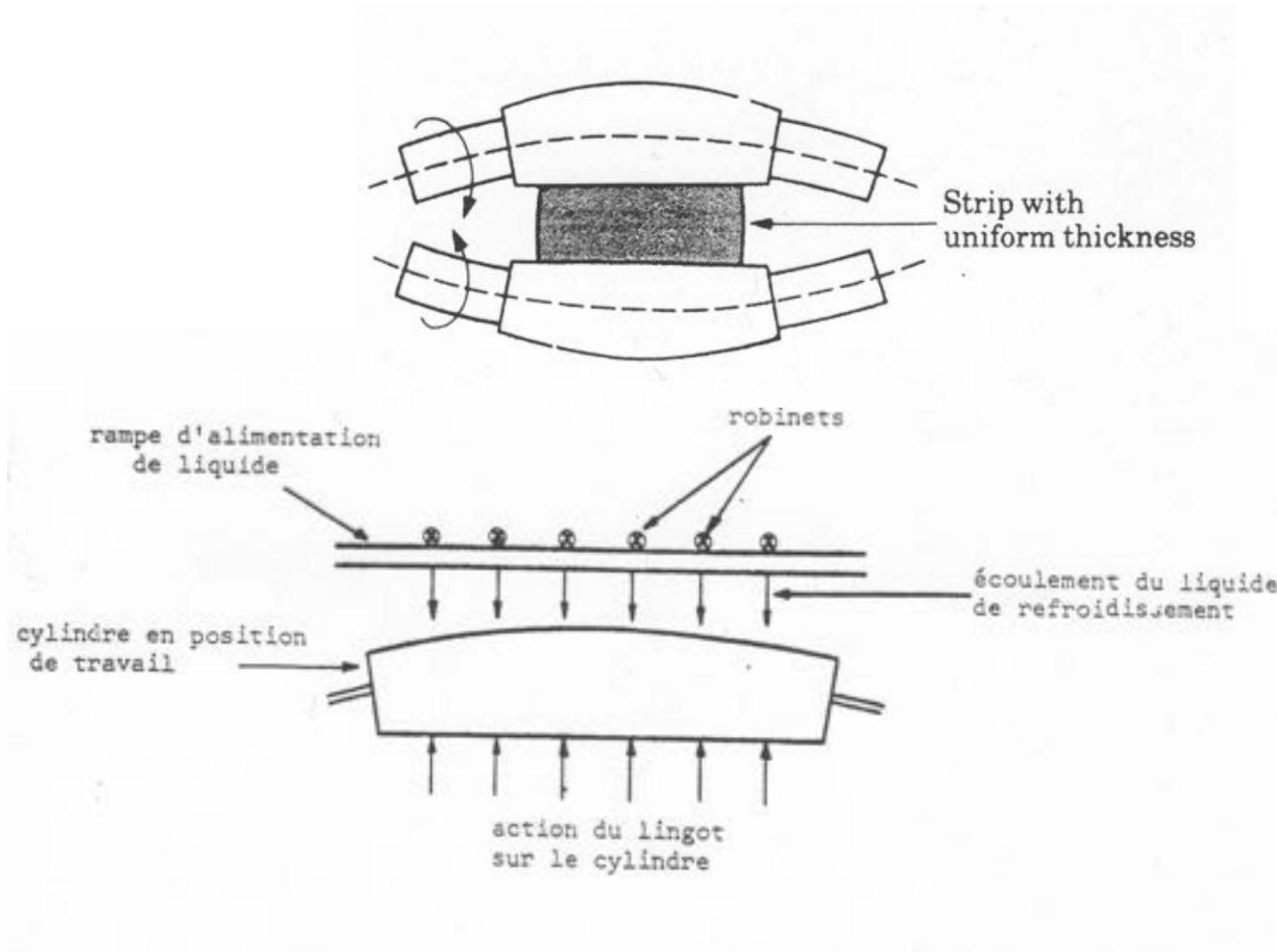
De plus,

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

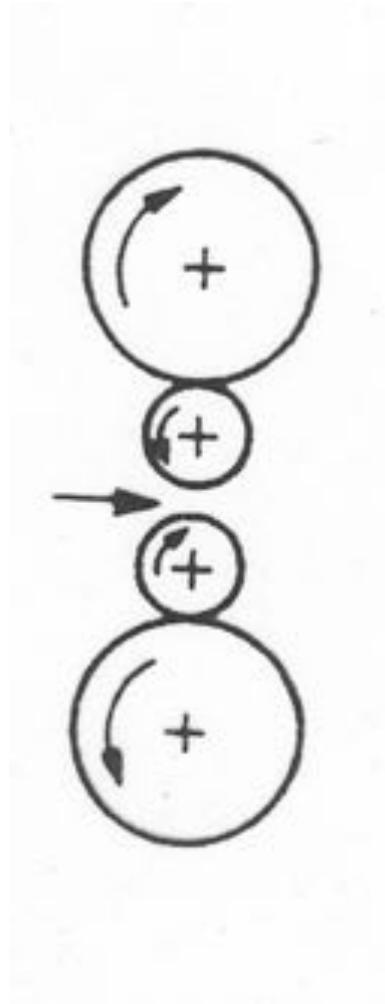
Déformations des cylindres de laminage



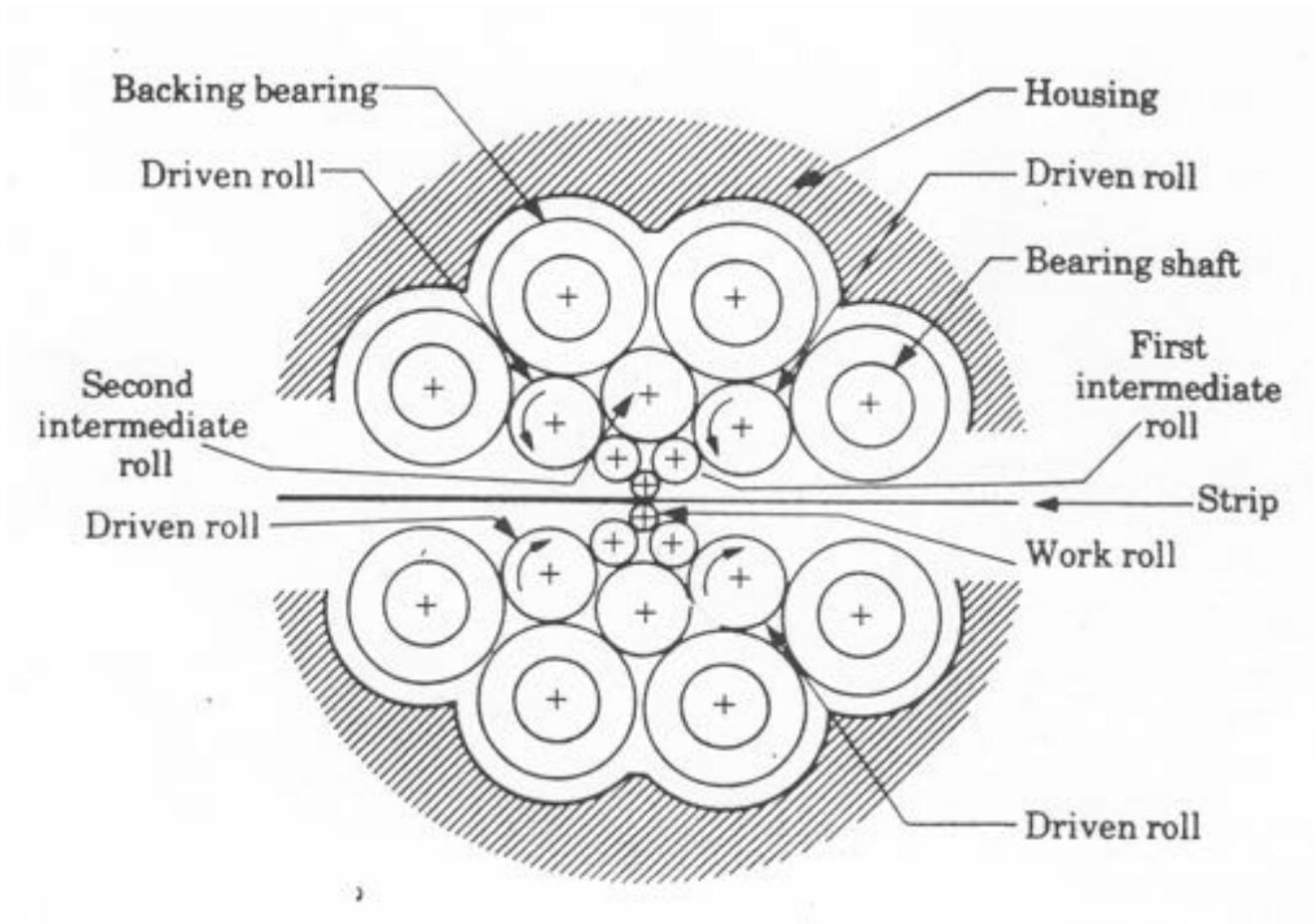
Déformations des cylindres de laminage



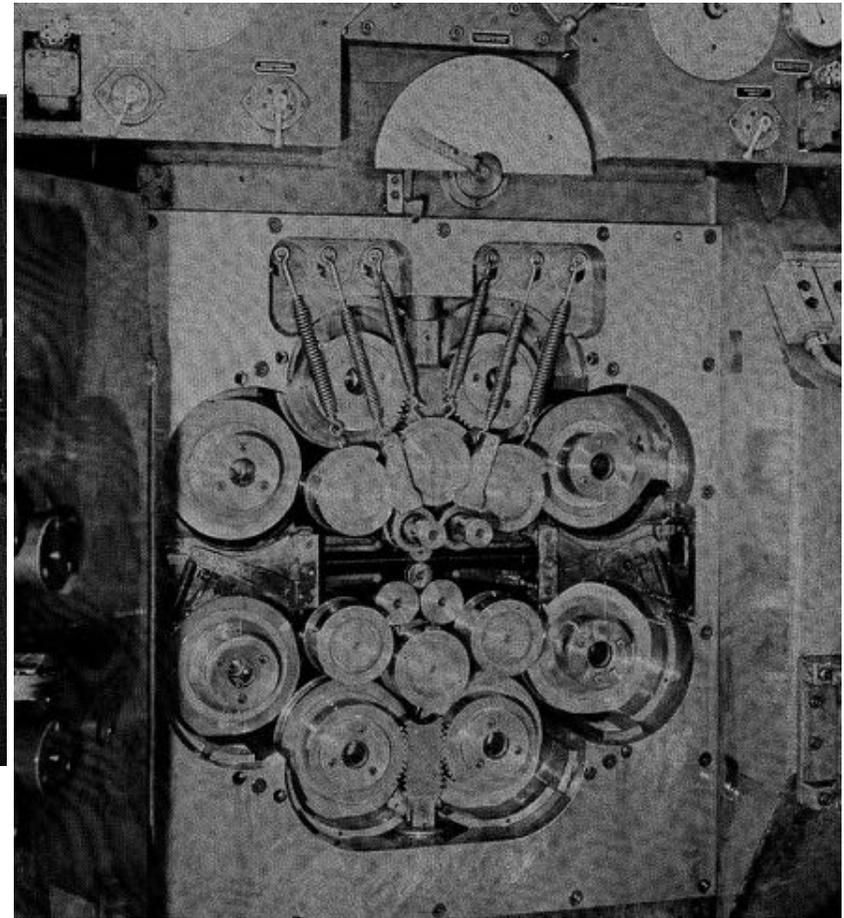
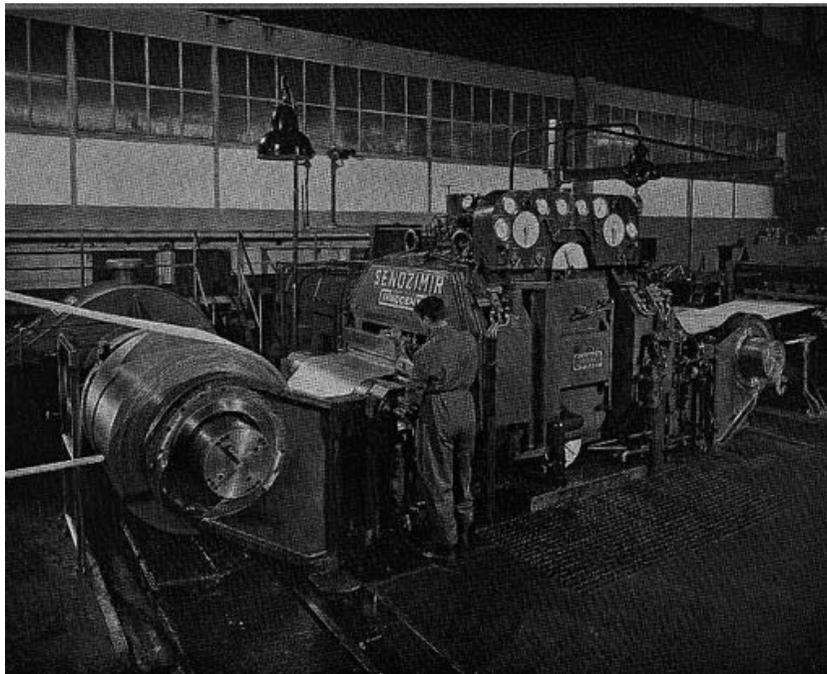
Laminoir quarto



Laminoir à 20 cylindres ou Sendzimir



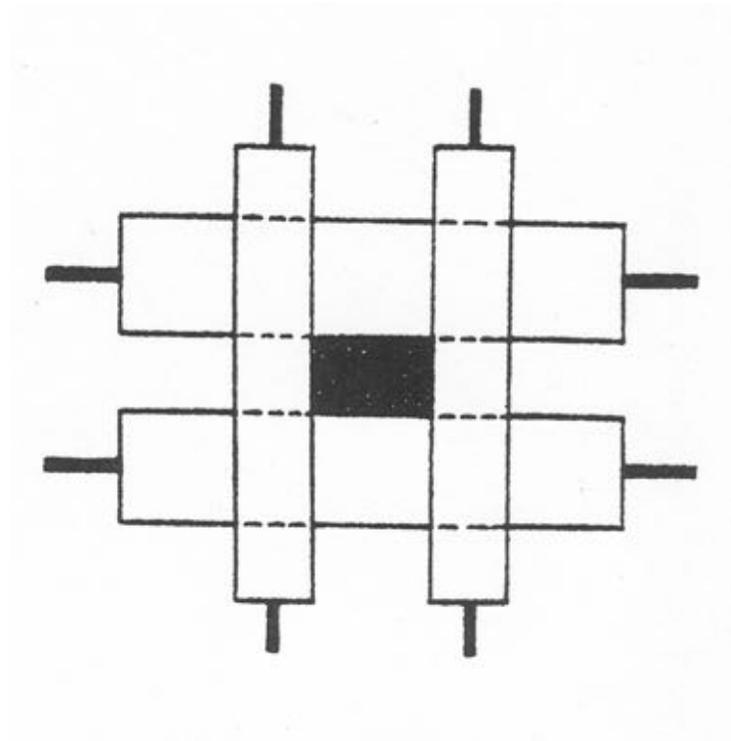
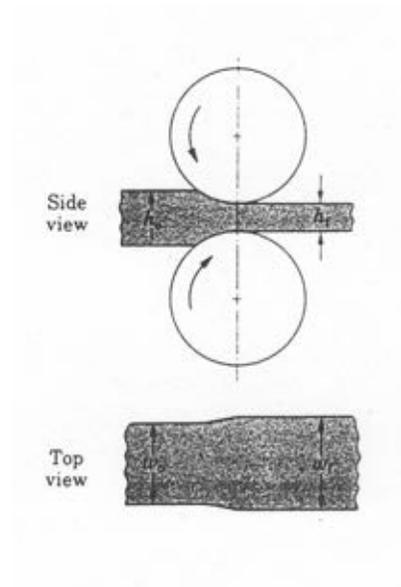
Laminoir à 20 cylindres ou Sendzimir



Exemple d'installation classique de laminoir Sendzimir :

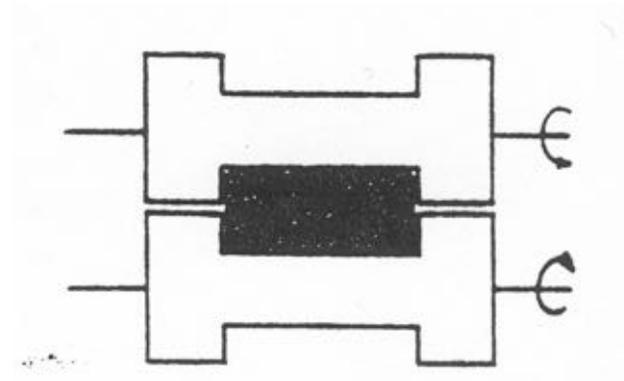
- vitesse : 7,50 m/sec
- bobine : 9 T
- traction : 20 T
- épaisseur de la tôle : 0,25 mm
- largeur de la tôle : 1,37 m
- diamètre des cylindres lamineurs : 50 mm
- puissance : 3380 kW
 - dont (2 x 940 kW pour la passe)
 - (2 x 750 kW pour les enrouleurs)
- largeur de la machine : 1,40 m
- hauteur de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

Déformation latérale du lingot

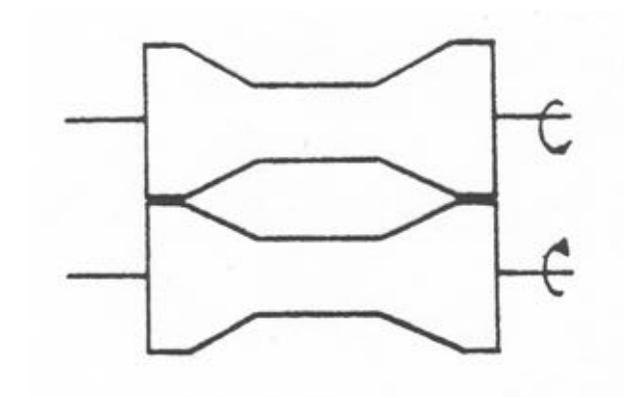


Laminage de mise en forme

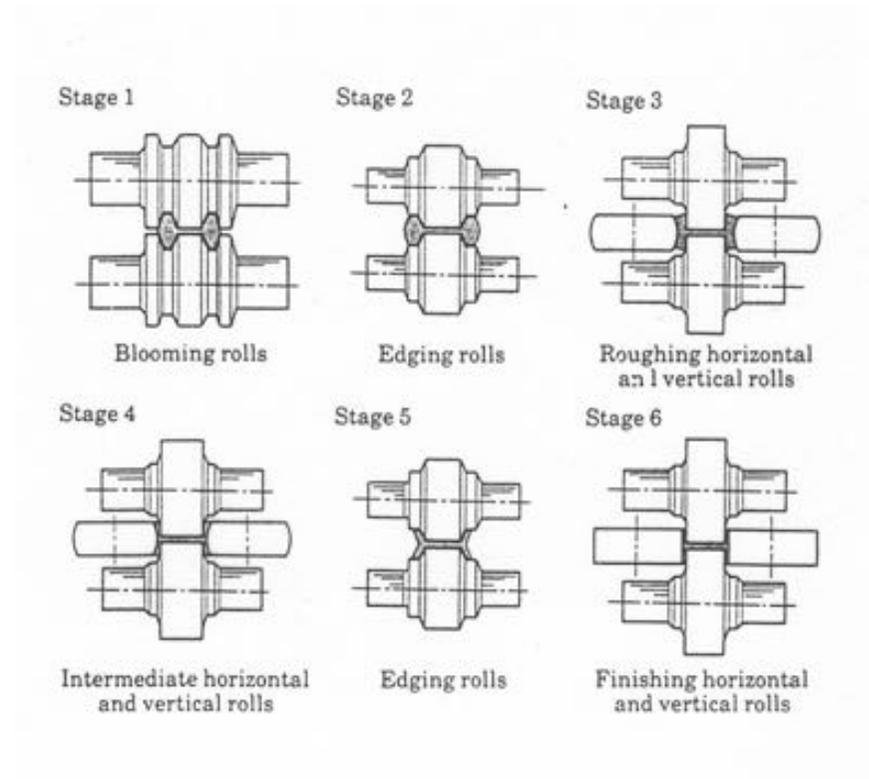
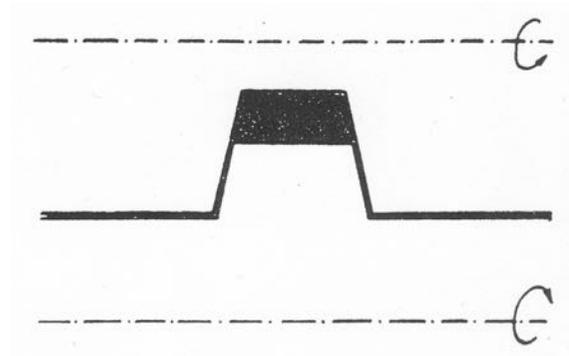
- les cannelures fermées



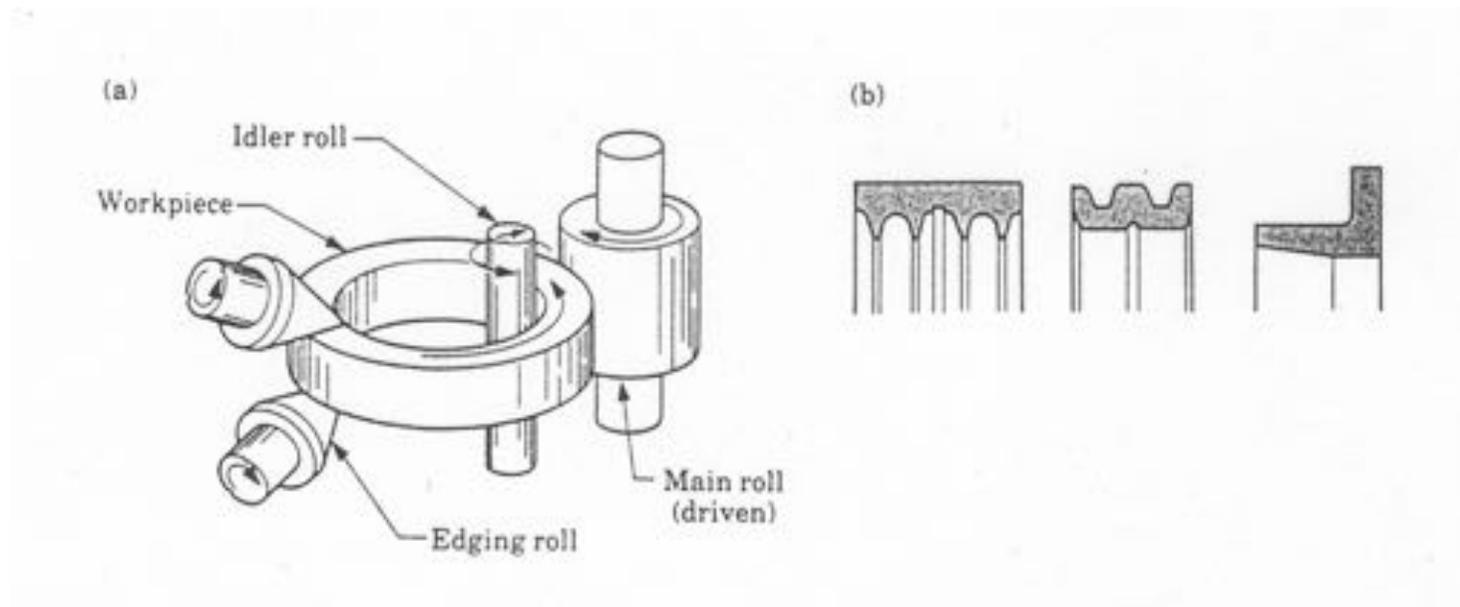
- les cannelures ouvertes



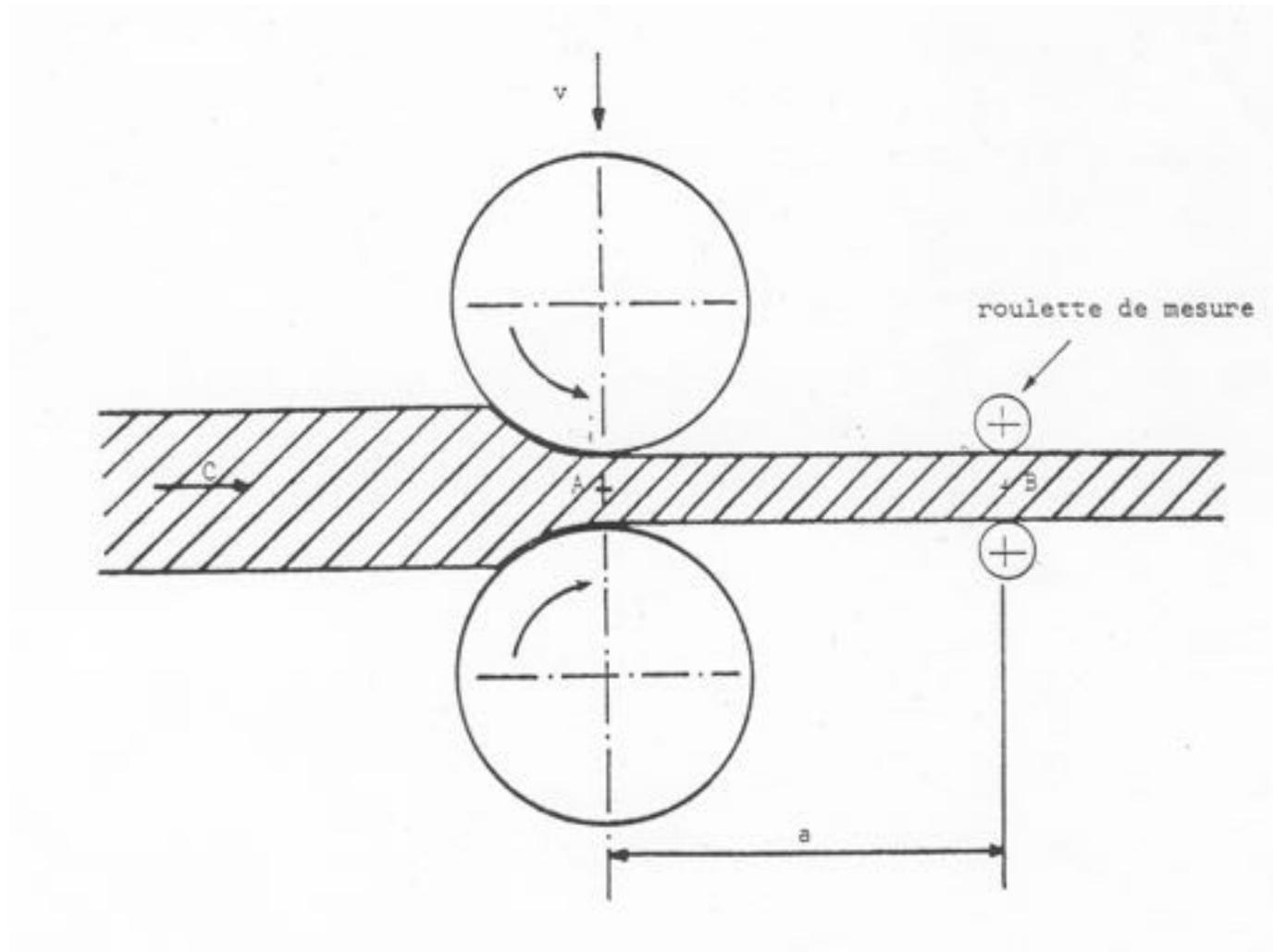
- les cannelures emboîtantes



Le laminage circulaire



Contrôle des laminaires



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, τ le temps entre le passage d'un y en A et en B :

$$\tau = a/c$$

Si on considère un laminoir à vitesse constante, τ 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 : $y(t) = e^{rt}$

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

Equation caractéristique transcendante :

$$r + k e^{-r\tau} = 0\tag{1}$$

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 :

$$dy/dt + ky = 0$$

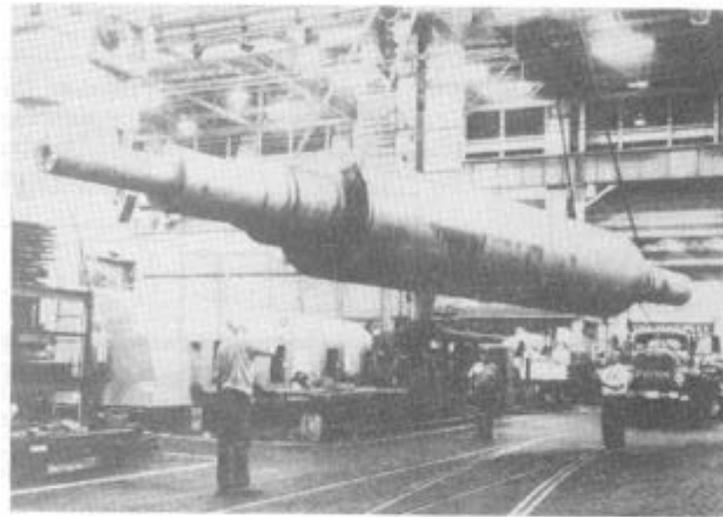
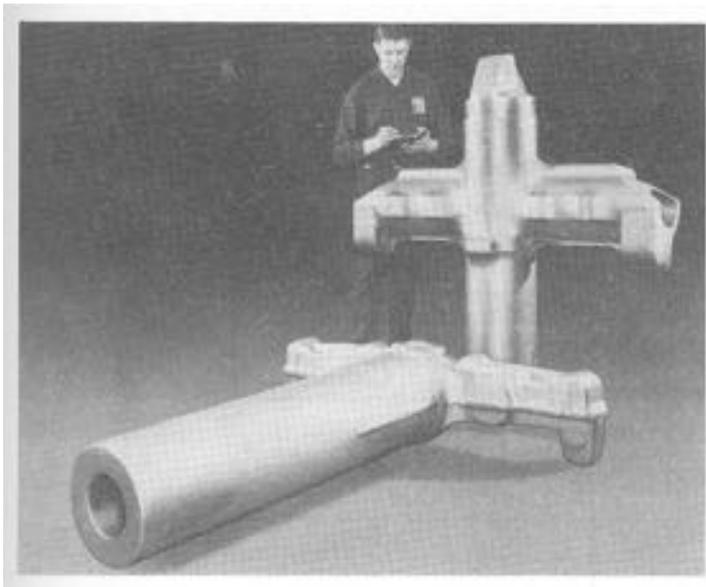
Solution : $y = e^{-kt}$

Le système est toujours stable.

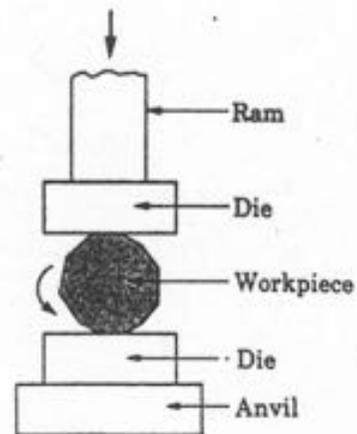
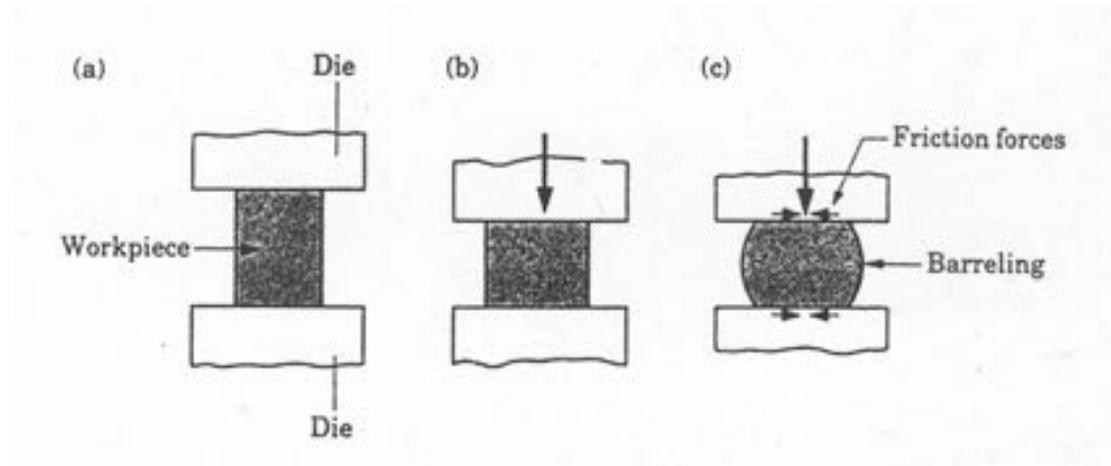
L'instabilité est donc créée par le retard de la transmission de l'information.

Le forgeage

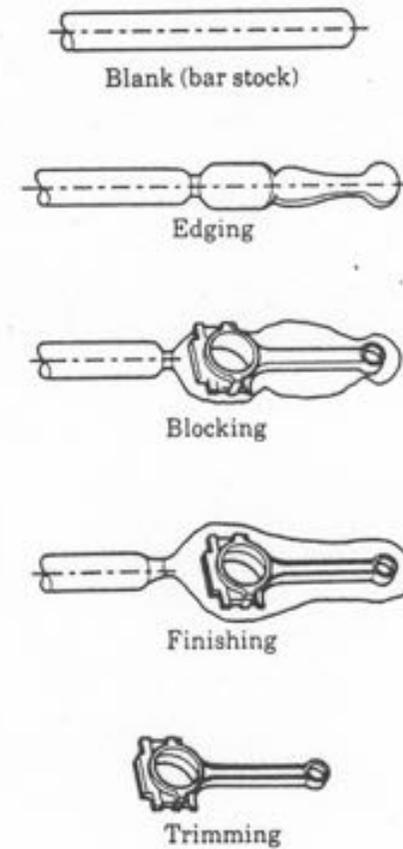
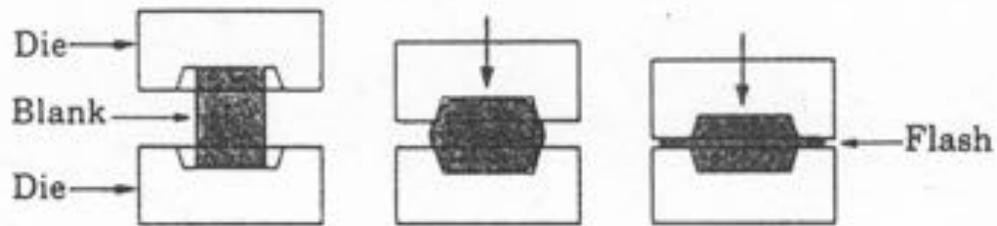
Le forgeage consiste à déformer des métaux préalablement chauffés ou non soit par chocs, soit par pression, dans le but de produire des pièces semi-finies de formes et dimensions préétablies.



Forgeage libre (*open-die forging*)



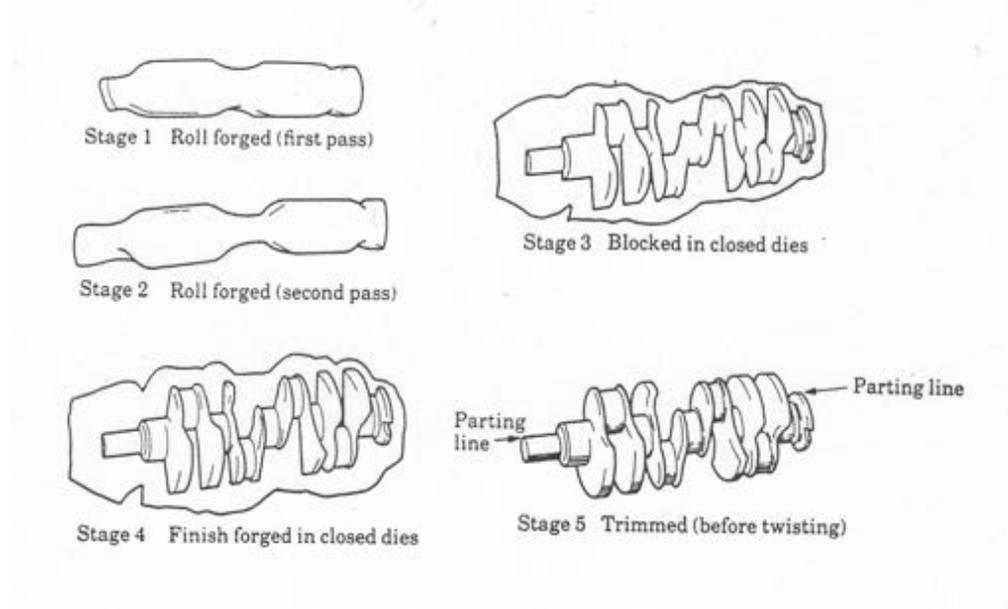
Forgeage à matrice fermée (*impression-die and close-die forging*)

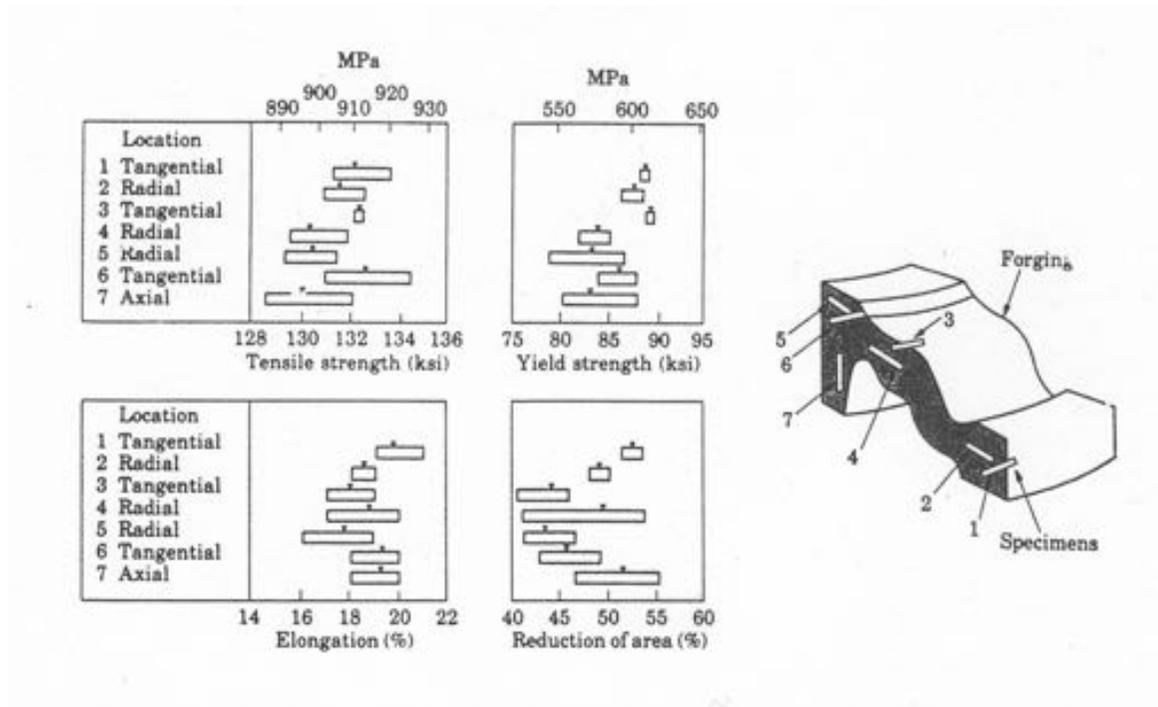


Conception des matrices de forgeage (*forging-die*)

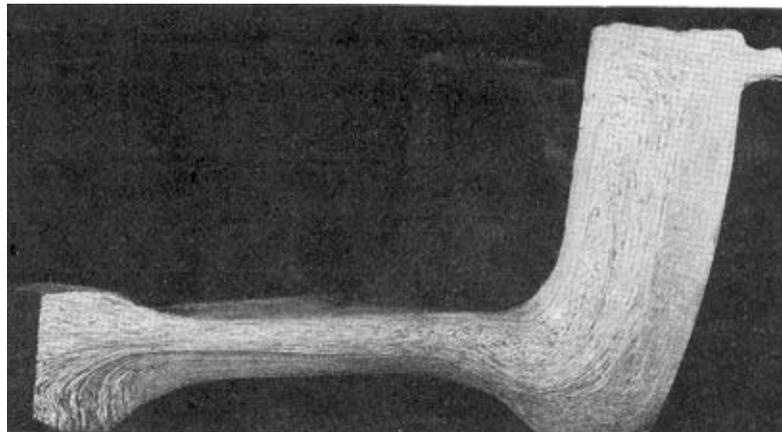
La conception exige une connaissance :

- 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).





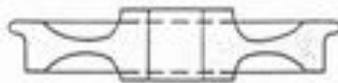
Step 1 Wheel block before forging



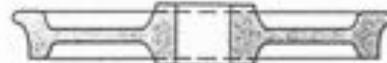
Step 2 Wheel blank after first forging



Step 3 Wheel blank after second forging



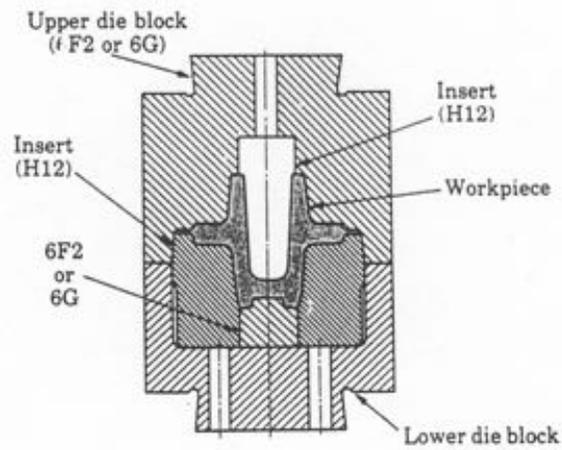
Step 4 Wheel blank after being punched



Step 5 Wheel after rolling

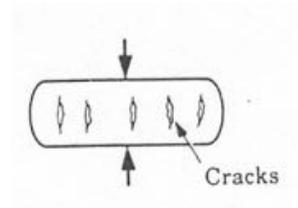


Step 6 Wheel after coning





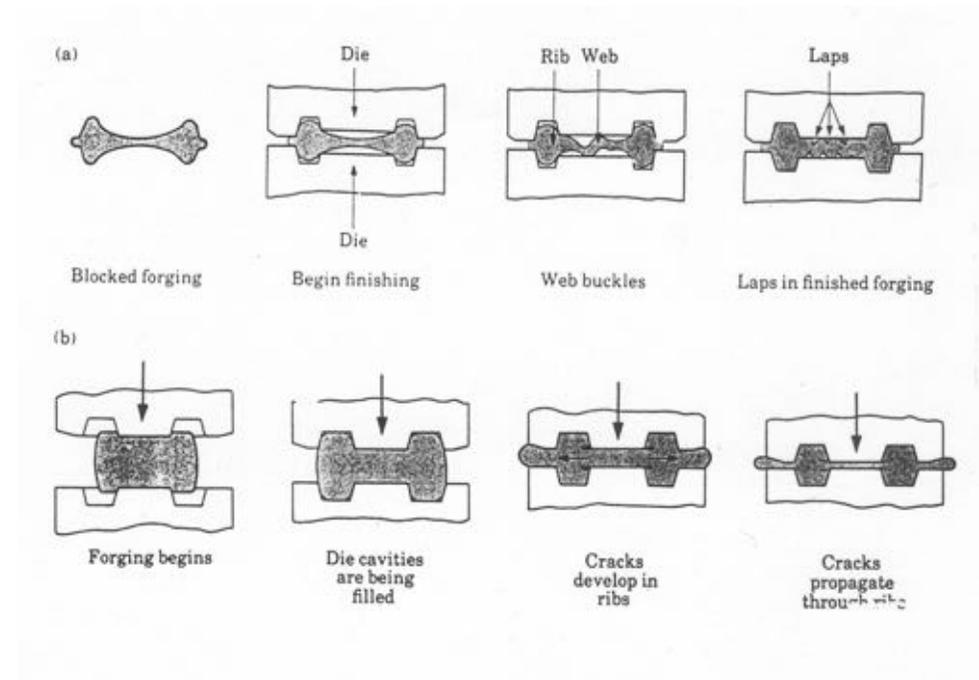
“Forgeabilité”



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.

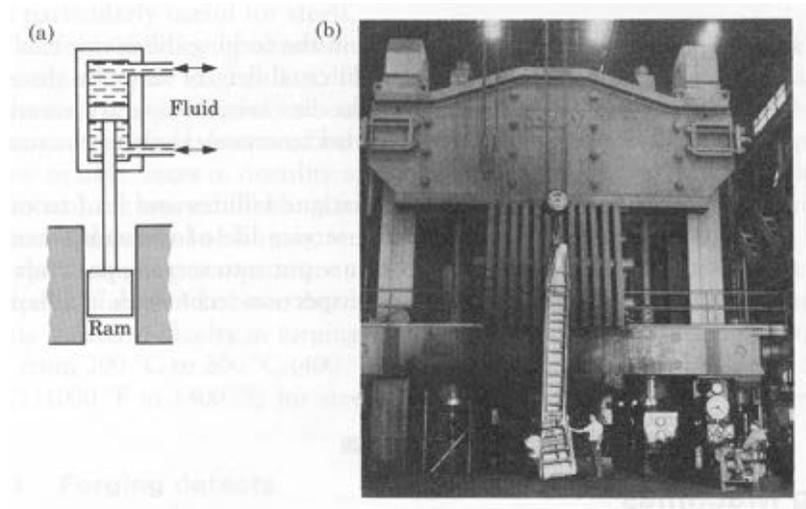
Tous ces défauts peuvent provoquer des ruptures par fatigue, de la corrosion ou de l'usure pendant la durée de vie du produit, d'où l'importance d'inspecter avec minutie les pièces forgées avant leur mise en service.

Les machines de forgeage

Les presses

Les presses hydrauliques

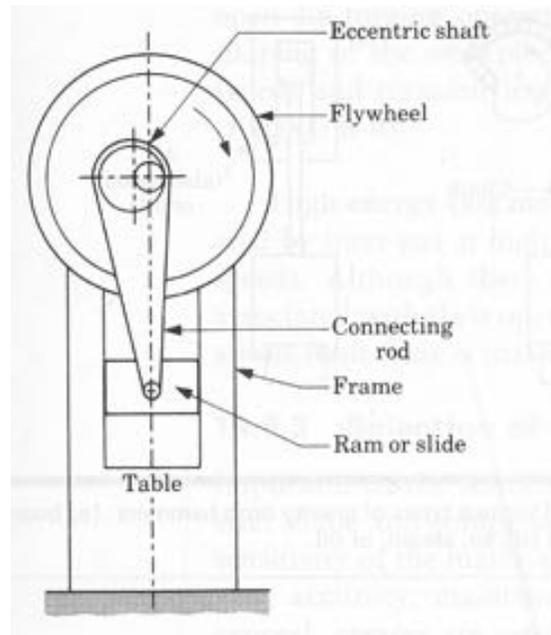
Elles fonctionnent à vitesse constante et sont limitées en charge (*load limited*) : la presse s'arrête si la charge requise excède sa capacité.



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.

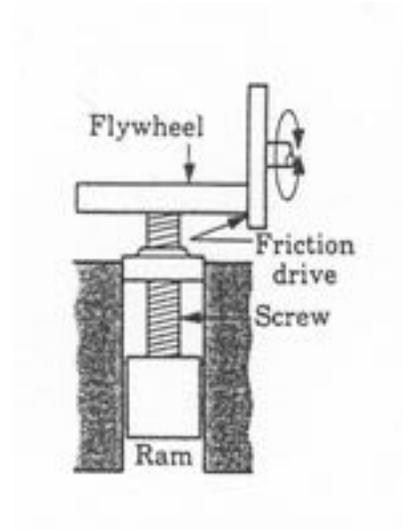
Les presses mécaniques



Presse à excentrique

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

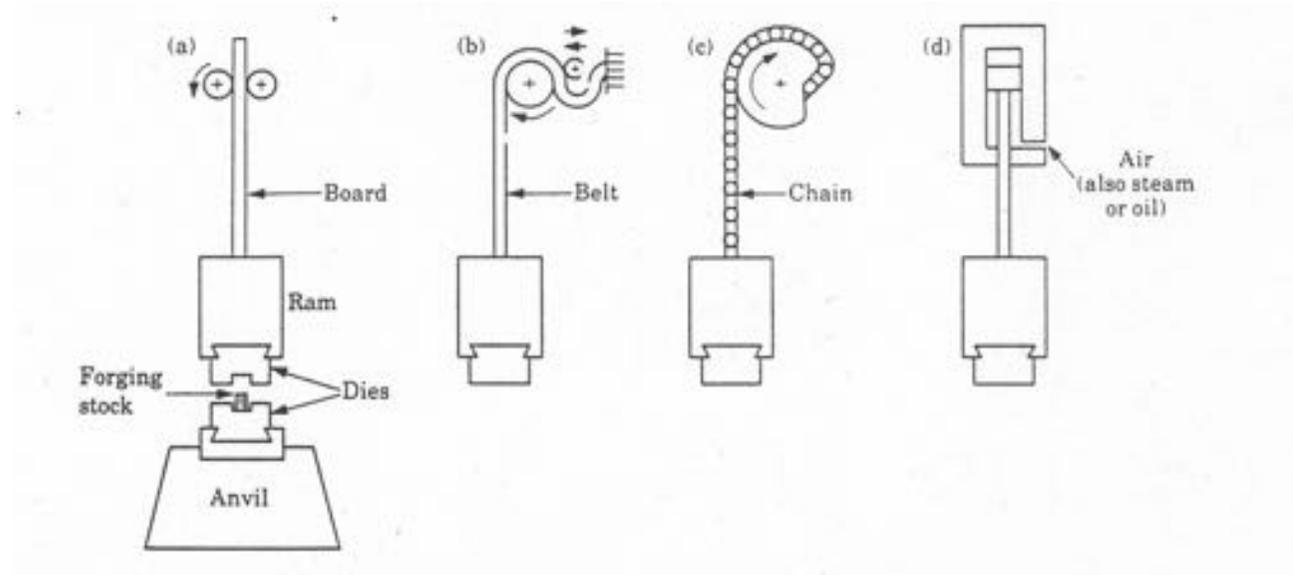
Les presses à vis



Presse à vis

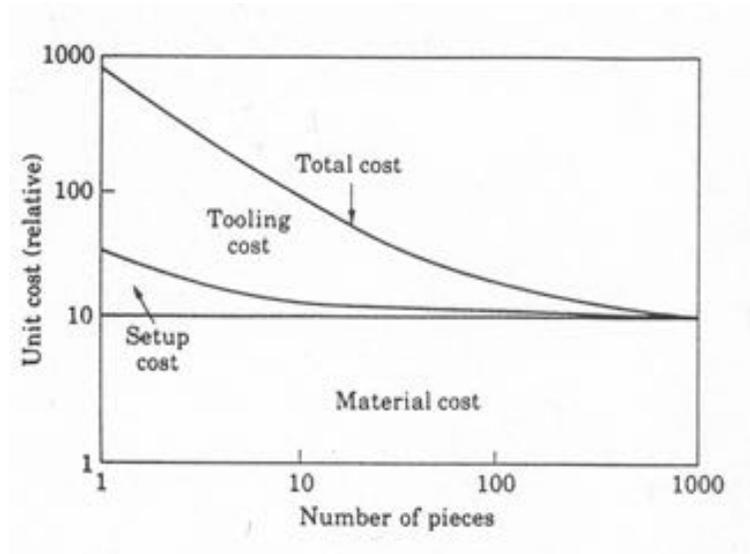
Les capacités des presses à vis vont de 160 tonnes à 31.500 tonnes.

Les marteaux

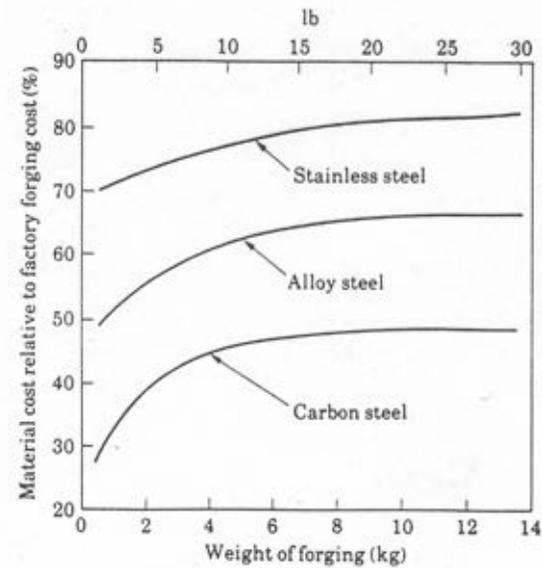


Les poids de coulisseau des 3 premiers types varient de 180 à 4.500 kg (avec des énergies atteignant les 120 kJ). Pour le 4ème type, les poids de coulisseau vont de 225 à 22.500 kg (avec des énergies atteignant les 1.150 kJ).

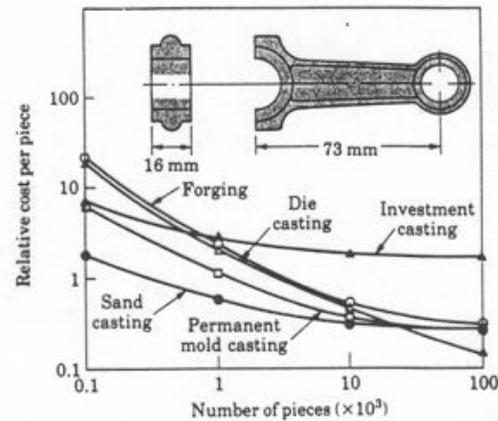
Coût du forgeage



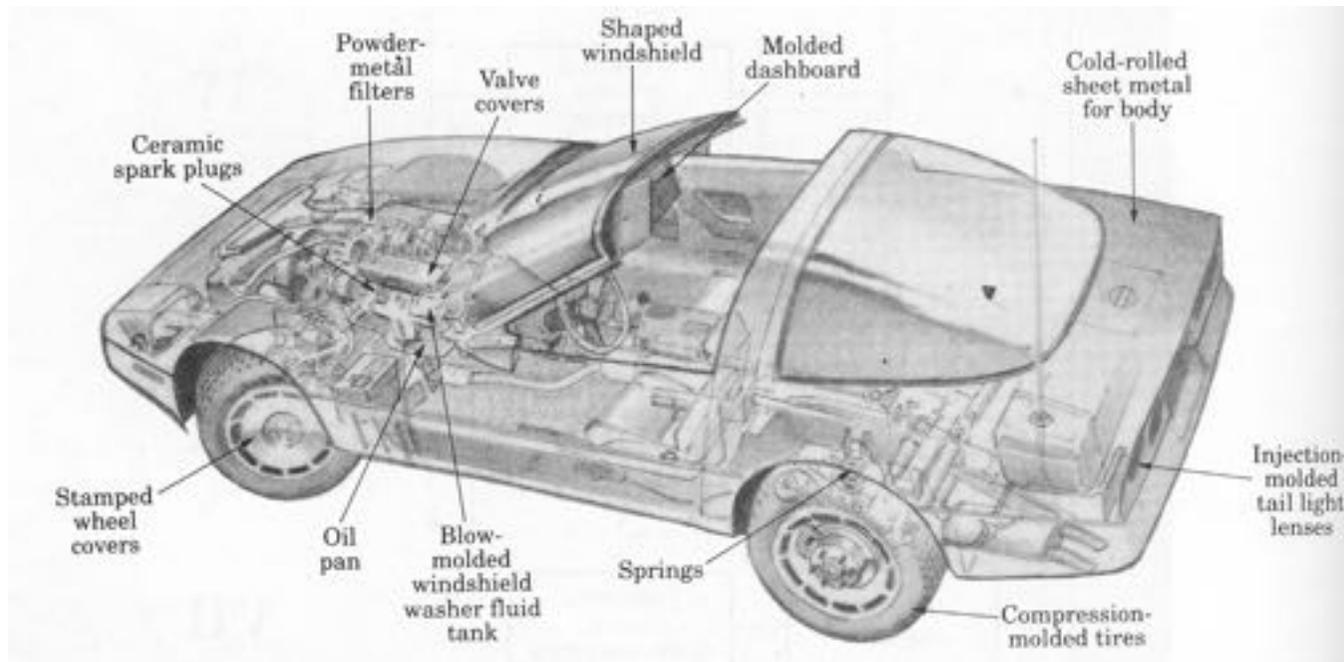
Coût par pièce en forgeage en fonction du nombre de pièces produites



Coût du matériau exprimé en pourcentage du coût total de forgeage

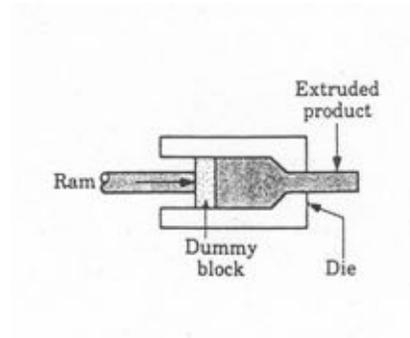


Coût unitaire d'une bielle obtenue par différents procédés en fonction des quantités de pièces produites.

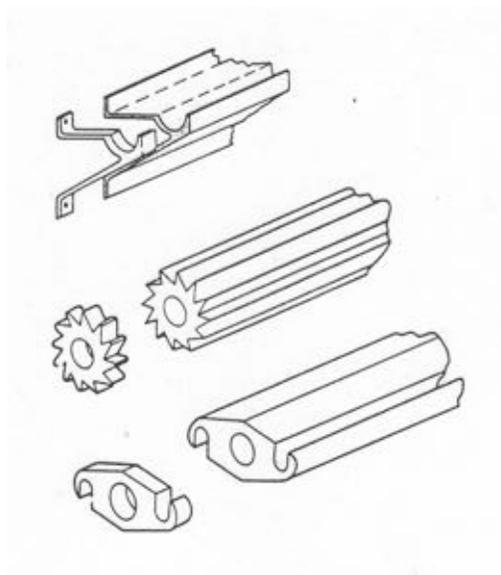


- le laminage (*rolling*),
- le forgeage (*forging*),
- l'extrusion (*extrusion*),
- l'étirage (*drawing*),
- le travail de la tôle (*sheet-forming*),
- la métallurgie des poudres (*powder metallurgy*),
- la mise en forme des plastiques et des matériaux composites

L'extrusion

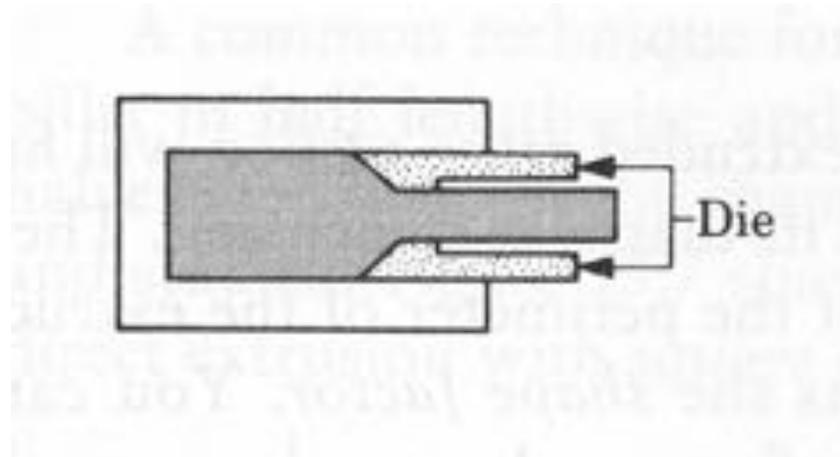


Extrusion directe



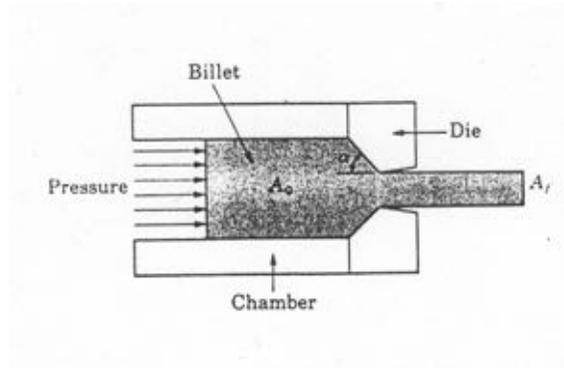
Exemples de produits extrudés

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

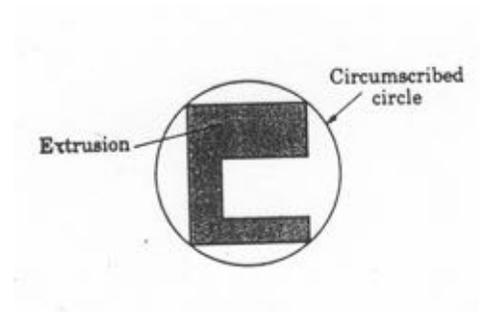


Extrusion indirecte

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.

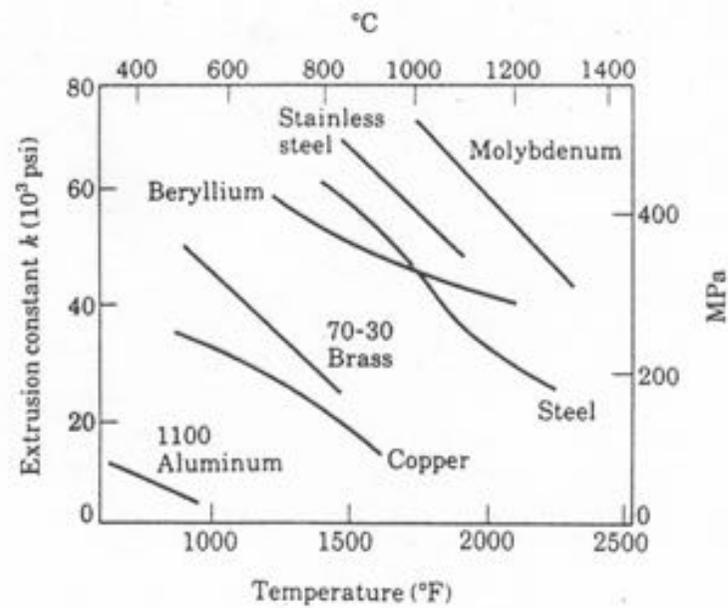
La force d'extrusion

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

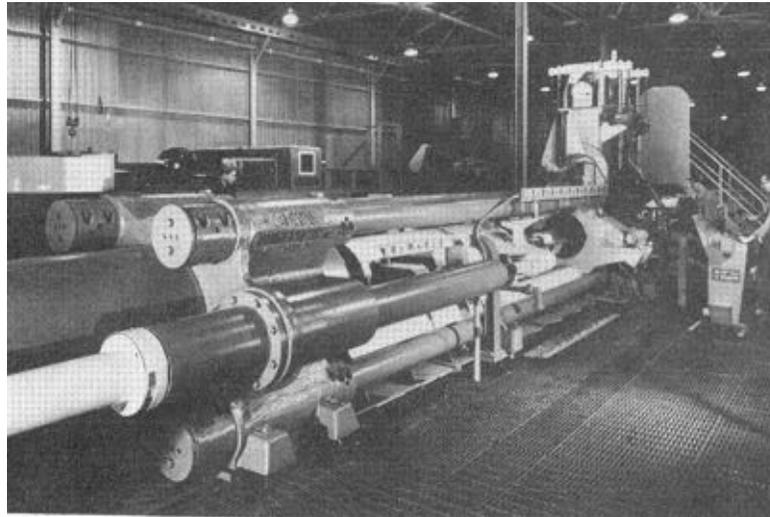
- du matériau utilisé,
- du rapport d'extrusion,
- des frottements dans la filière,
- de la température du matériau,
- de la vitesse d'extrusion.

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

où k est la constante d'extrusion.

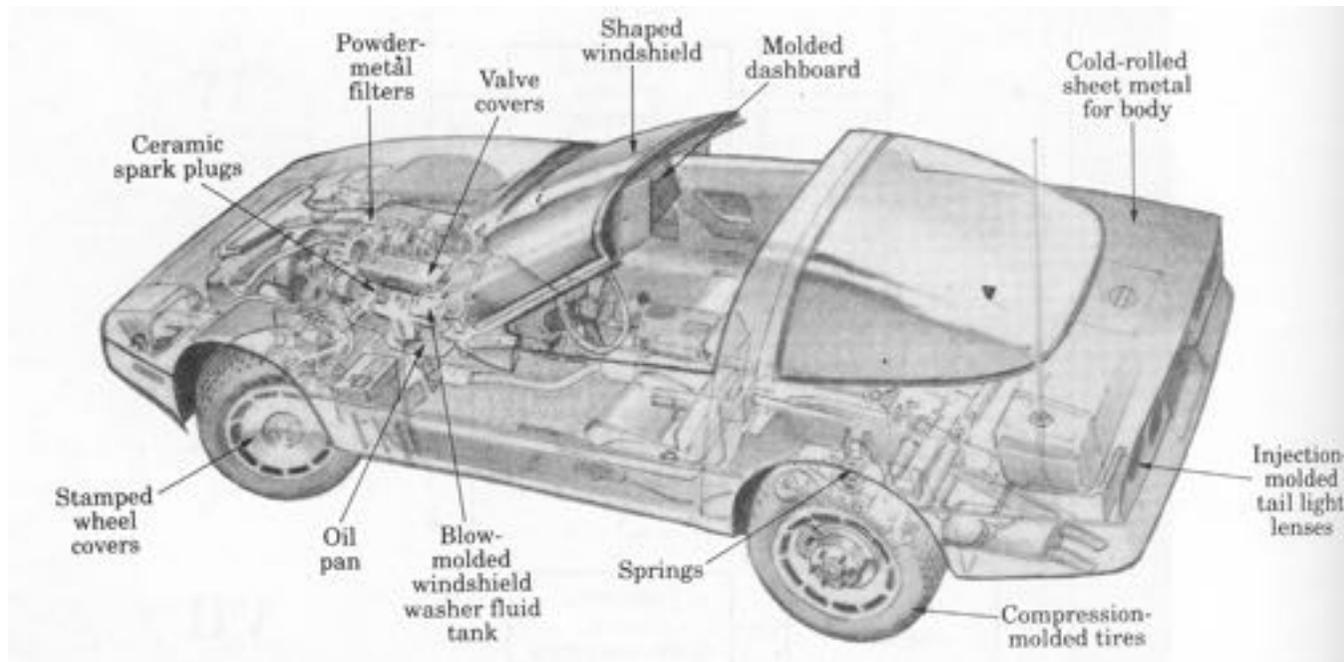


Les extrudeuses



Vue générale d'une extrudeuse hydraulique de 1000 tonnes

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

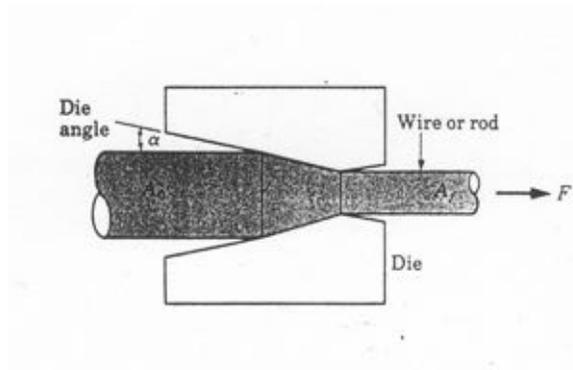


- le laminage (*rolling*),
- le forgeage (*forging*),
- l'extrusion (*extrusion*),
- l'étirage (*drawing*),
- le travail de la tôle (*sheet-forming*),
- la métallurgie des poudres (*powder metallurgy*),
- la mise en forme des plastiques et des matériaux composites

L'étirage

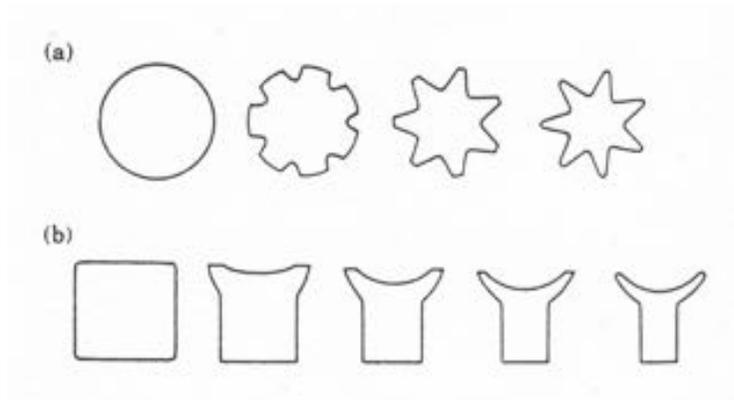
L'étirage (*drawing*) consiste à réduire ou à modifier la section transversale d'un rond, d'un fil, d'un câble ou d'un tube en la tirant à travers une filière.

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

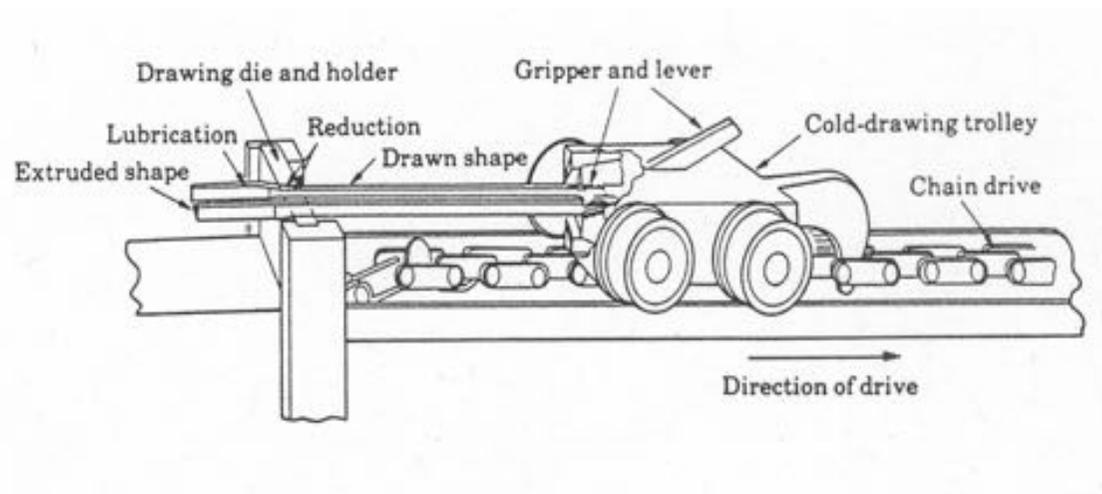
Il y a une limite à l'accroissement de la force et donc à la réduction du diamètre : elle est atteinte quand les contraintes de traction atteignent la limite élastique car la matière va s'affaisser et continuer à se déformer en dehors de la filière, ce qui est inacceptable. Idéalement, la réduction maximum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



Exemples de formes de sections transversales obtenues
par étirage

Les machines d'étirage

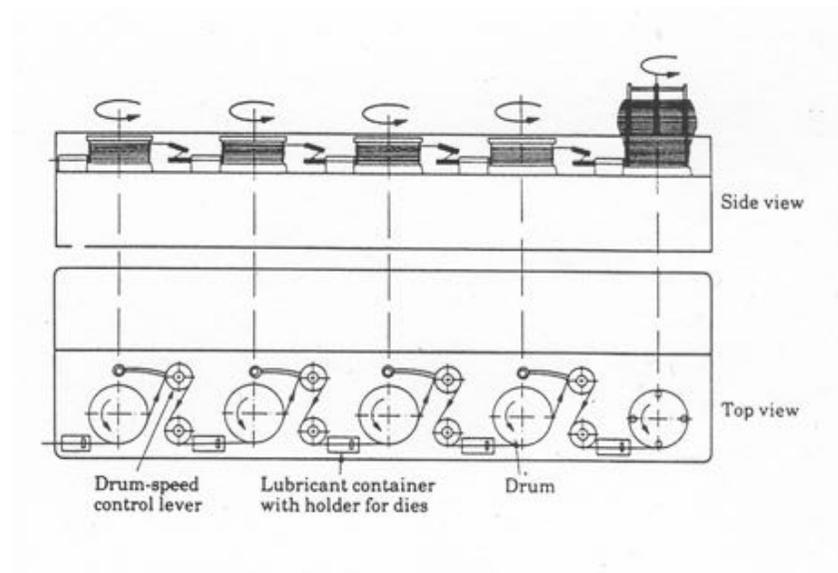
Banc à étirer



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

