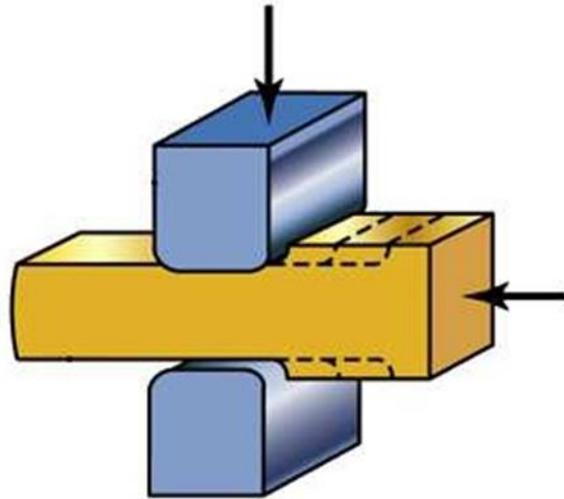
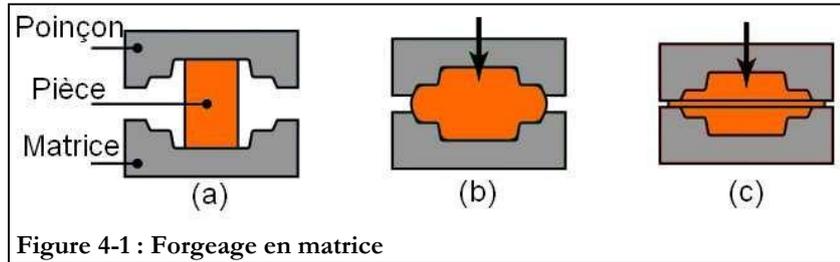


Chapitre 2 : Forgeage



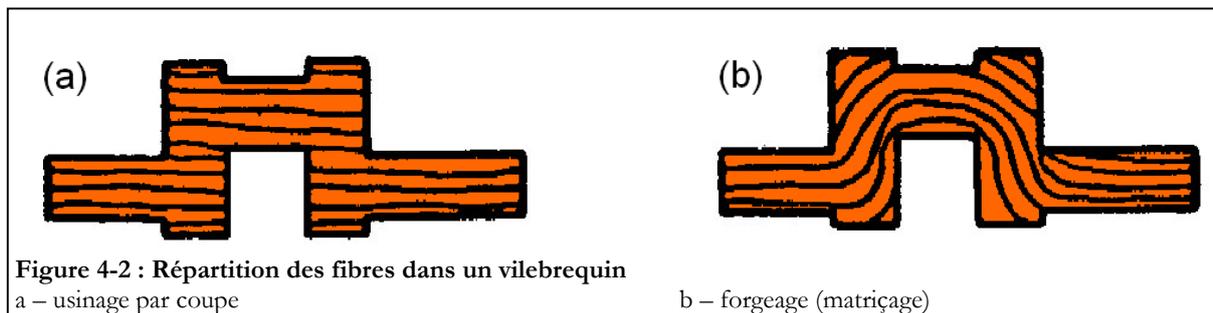
1. Principe

Le forgeage est un procédé dans lequel on provoque une déformation plastique dans la masse d'une pièce, capable de modifier toutes les dimensions. Nous traiterons à part le travail des métaux en feuilles dans lequel une dimension, l'épaisseur, est à peu près maintenue. On distingue le forgeage libre et le forgeage en matrice (figure 4-1).



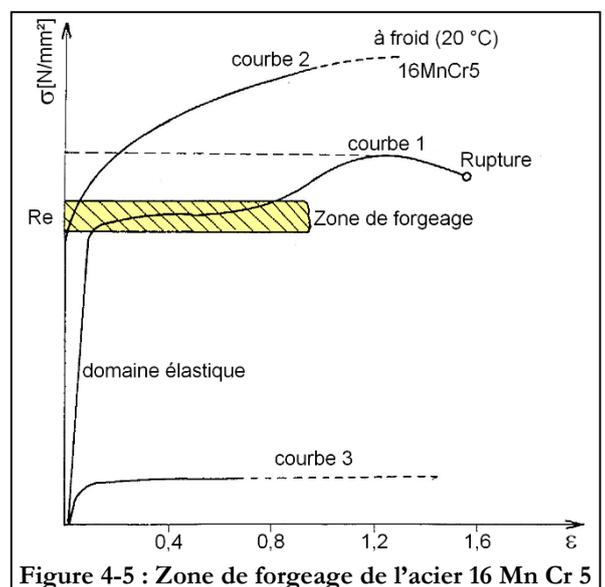
2. Fibres

Les métaux sont composés de cristaux qui, à l'état naturel, ont des formes quelconques. Par déformation plastique, on provoque un allongement des cristaux dans la direction de plus grand allongement : ce sont les fibres. La résistance dans le sens des fibres est meilleure que dans le sens perpendiculaire. La figure 4-2 illustre la répartition des fibres que l'on obtient par usinage et par forgeage. La répartition obtenue dans ce dernier cas est bien plus favorable.



3. Zone de forgeage

Le forgeage se fait normalement dans le palier plastique. Il en résulte que l'acier doux peut être forgé à froid. Les fontes courantes, raides et cassantes, ne peuvent pas être forgées. De nombreux aciers durs n'ont pas de palier plastique. Mais en les chauffant, on peut abaisser leur contrainte plastique et même créer un palier. C'est ce que montre la figure 4-5 pour l'acier 16 Mn Cr5.



4. Pénétration de la plasticité

Considérons une pièce soumise à la pression de l'outil sur une partie de sa longueur (figure 4-6).

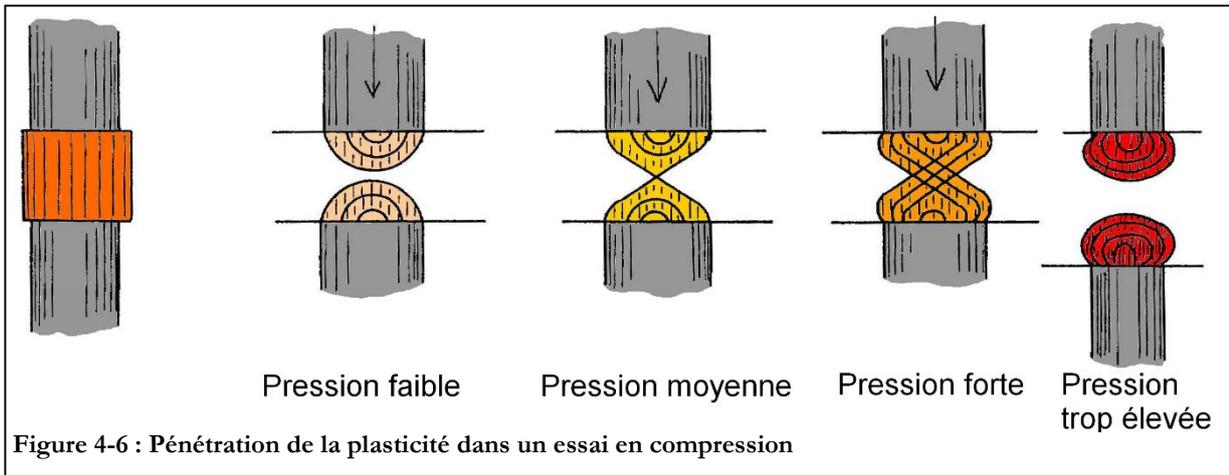


Figure 4-6 : Pénétration de la plasticité dans un essai en compression

a) Si la pression est faible, la plastification ne se produit qu'à une profondeur réduite. Isolons par la pensée cette zone plastifiée du reste de la pièce. Allongée et écrasée, elle ne s'emboîte plus naturellement dans la partie restante, et on ne peut recoller les morceaux qu'en créant de fortes contraintes résiduelles, de compression en surface et de traction à cœur. Ces contraintes rendent la pièce plus résistante en surface mais plus fragile à cœur. On dit, dans ce cas que la pièce n'est pas forgée à cœur. Il s'agit d'un défaut à éviter.

(Il existe cependant certains cas où des contraintes résiduelles de compression en surface sont recherchées, notamment pour améliorer le comportement en fatigue. En particulier, le galetage, qui consiste à faire passer un galet sous pression sur la surface, provoque un forgeage superficiel et, par conséquent, ces contraintes résiduelles, pour autant que la pression ne soit pas trop élevée).

b) En augmentant la pression, on parvient à obtenir une zone plastique s'étendant à travers toute l'épaisseur de la pièce. De cette façon, les parties restées élastiques sont entièrement séparées par la zone plastique et peuvent donc avoir un déplacement d'ensemble tel que les contraintes résiduelles disparaissent. On dit alors que l'on a forgé à cœur. C'est ainsi qu'il faut travailler dans les conditions normales.

c) Cependant, si la pression est très élevée sur une largeur très faible, on risque des ruptures superficielles. On se rapproche alors du tranchage.

5. Influence des frottements

Soit à nouveau une pièce pressée entre des plateaux. Le frottement de la pièce sur ceux-ci entrave sa dilatation latérale. Il en résulte une forme de tonneau (figure 4-7) et, de plus, la section est déformée (figure 4-8), car le chemin que doivent suivre les angles pour maintenir les formes mènerait à un travail trop grand. La déformation se fait toujours selon un minimum d'énergie

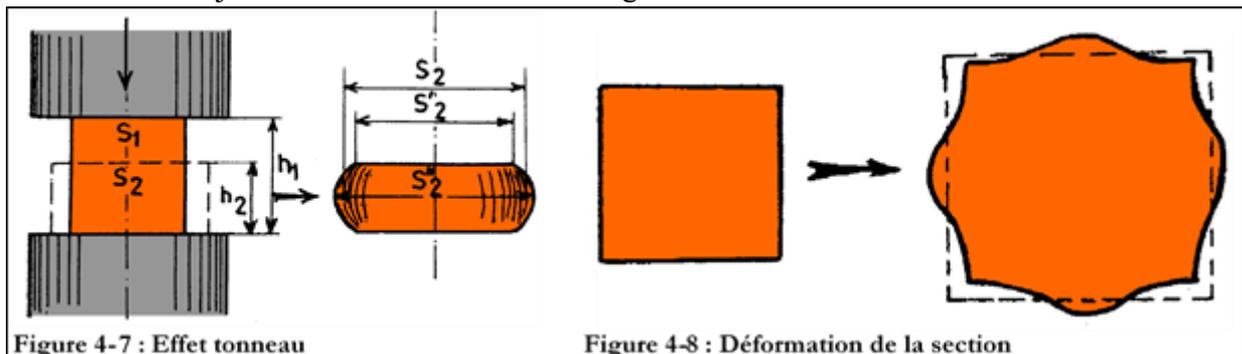


Figure 4-7 : Effet tonneau

Figure 4-8 : Déformation de la section

6. Choix de la température de refolement pour un acier

La contrainte de refolement décroît avec la température. La température de 850°C, correspondant à un minimum relatif, donne aussi la plus grande ductilité. Le forgeage au marteau demande des efforts plus importants car la vitesse de déformation est plus grande. (Une augmentation de ϵ mène à un durcissement).

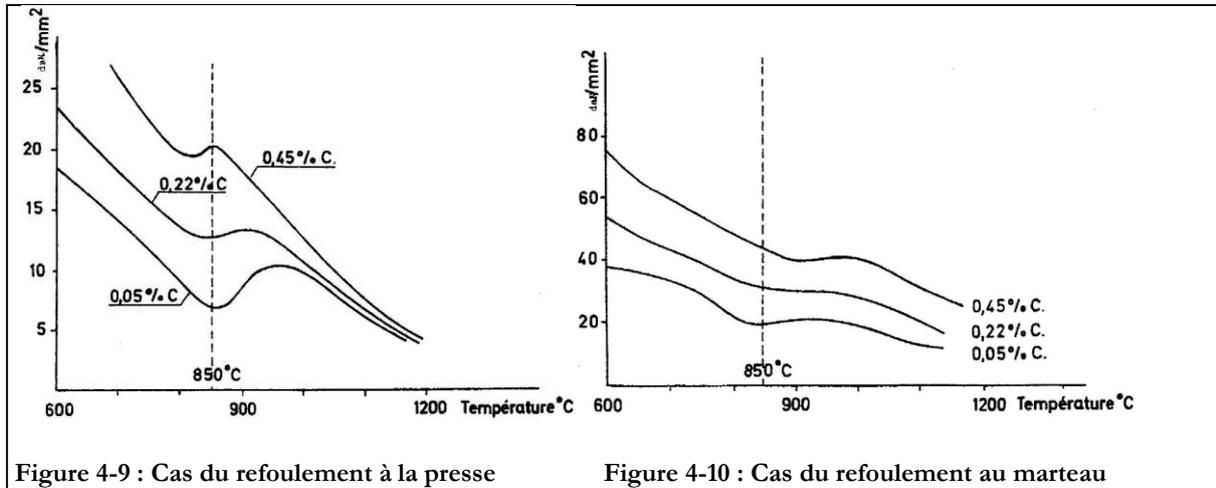


Figure 4-9 : Cas du refolement à la presse

Figure 4-10 : Cas du refolement au marteau

7. Pièces à forger

On part généralement de billettes ou barres à section ronde ou carrée (figure 4-11). Dans cet état, le métal a déjà subi un martèlement intense destiné à affiner et souder les grains. Rappelons :

lingot □ bloom □ brame □ billette (barre)

↓ bloom allongé et aplati (rectangulaire)

Pour les très grosses pièces, on part directement du lingot, après avoir enlevé la partie supérieure contenant des retassures et fêlures (figure 4-12).

Voici quelques ordres de grandeur des efforts à appliquer.

(La solidification conduit toujours à une forme d'entonnoir (figure 4-13). Ceci peut s'expliquer comme suit : lorsque la première tranche, la plus proche de la surface, se solidifie, le niveau est maximum. La solidification de la tranche suivante se produit après refroidissement et contraction du liquide restant : le niveau a donc baissé et ainsi de suite.

Les impuretés, plus légères que le métal, surnagent toujours. On les retrouvera donc dans la partie supérieure du lingot.)

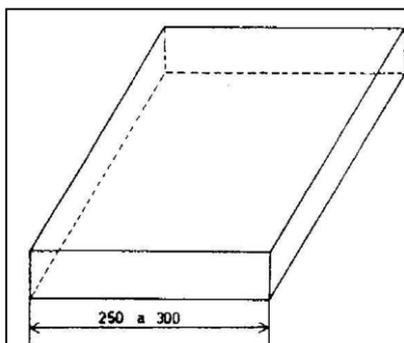


Figure 4-11 : Bloom

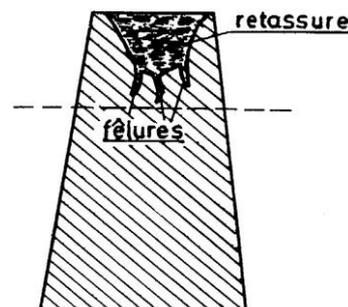
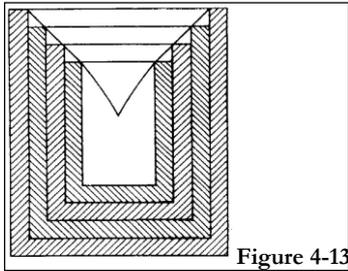


Figure 4-12 : Retrait des défauts



Billetes (rondes ou carrées)	
Côté □ 150 mm	Marteau de 500 kg
200 mm	Marteau de 900 kg
300 mm	Marteau de 1800 kg
450 mm	Marteau de 3000 kg
Lingots (section orthogonale)	
550 mm	Marteau 10 000 kg
650 mm	Presse de 150 kN
2200 mm	Presse de 1500 kN

8. Marteaux et presses

8.1. Marteau-pilon à air comprimé

1. Cylindre de compression, 2. Cylindre de travail, 3. Piston de compression, 4. Piston de travail

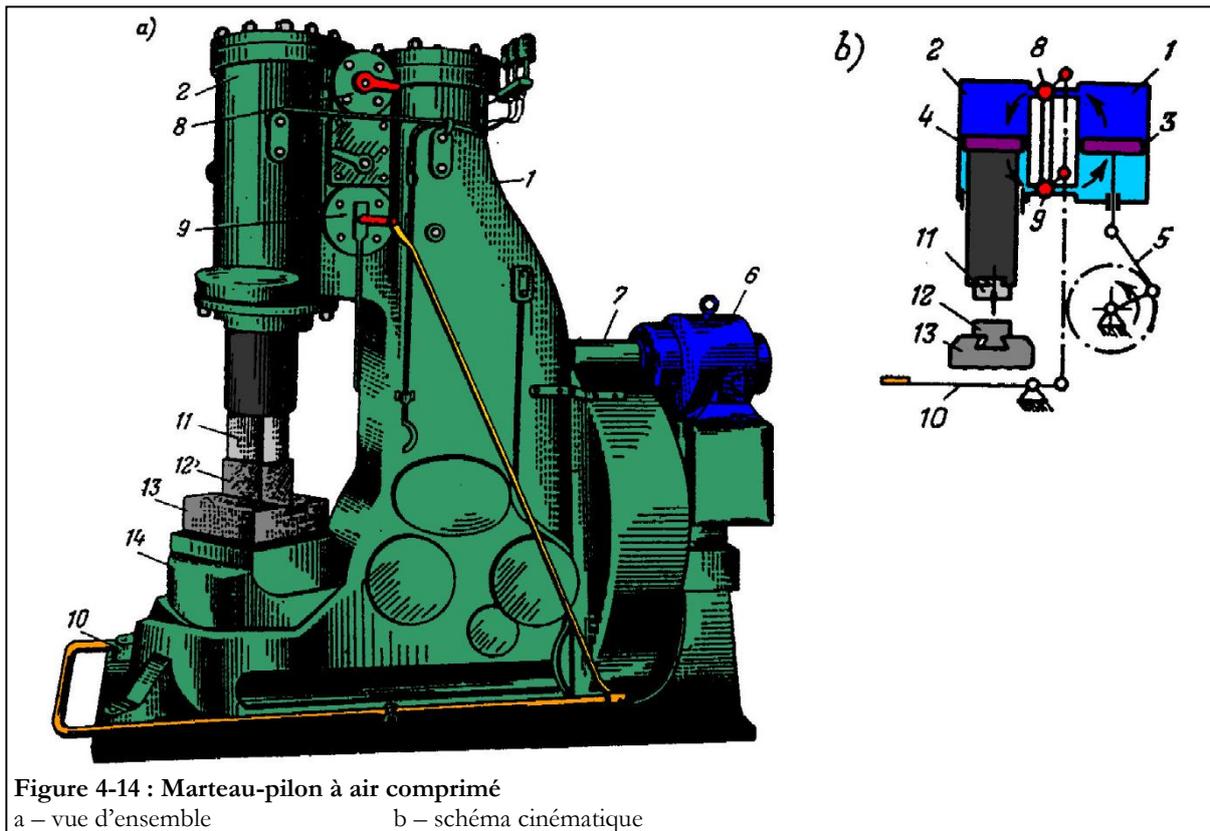


Figure 4-14 : Marteau-pilon à air comprimé
a – vue d’ensemble b – schéma cinématique

Le système bielle-manivelle 5, actionné par le moteur électrique 6, par l’intermédiaire du réducteur 7, transmet au piston de compression un mouvement de va-et-vient. Les robinets 8 et 9 dirigent le débit vers le sommet ou le bas du piston de travail. Ils sont commandés par la pédale 10.

11. Frappe supérieure, 12. Frappe inférieure } assemblage par queue d’aronde amovible
13. Coussin

14. Chabotte : n’est pas liée au bâti du marteau.

La masse du marteau est de 50 kg à 1 t. La masse de chabotte est de 15 à 20 fois la masse tombante. Il existe des marteaux-pilons à vapeur et à air.

8.2 Marteau-pilon à double montant

Ces marteaux-pilons (figure 4-15) peuvent être à vapeur ou à air. Ils existent à simple ou double effet (cas le plus fréquent à l’heure actuelle).

La vapeur ou l'air comprimé est refoulé(e) dans le cylindre de travail sur le tiroir 1 commandé par l'opérateur, au moyen du levier 2. La frappe supérieure 3 est fixée sur le coulisseau 4. Le coulisseau est rattaché à l'extrémité inférieure de la tige 5. L'extrémité supérieure de la tige 5 est fixée au piston 6 du cylindre de travail.

L'enclume fixe 7 est montée sur le bloc inférieur d'acier 8, lui-même attaché à la chabotte 9. Cette dernière est indépendante du bâti. La masse tombante peut aller de 0,5 à 5 t. La pression de vapeur est de 6 à 8 bar.

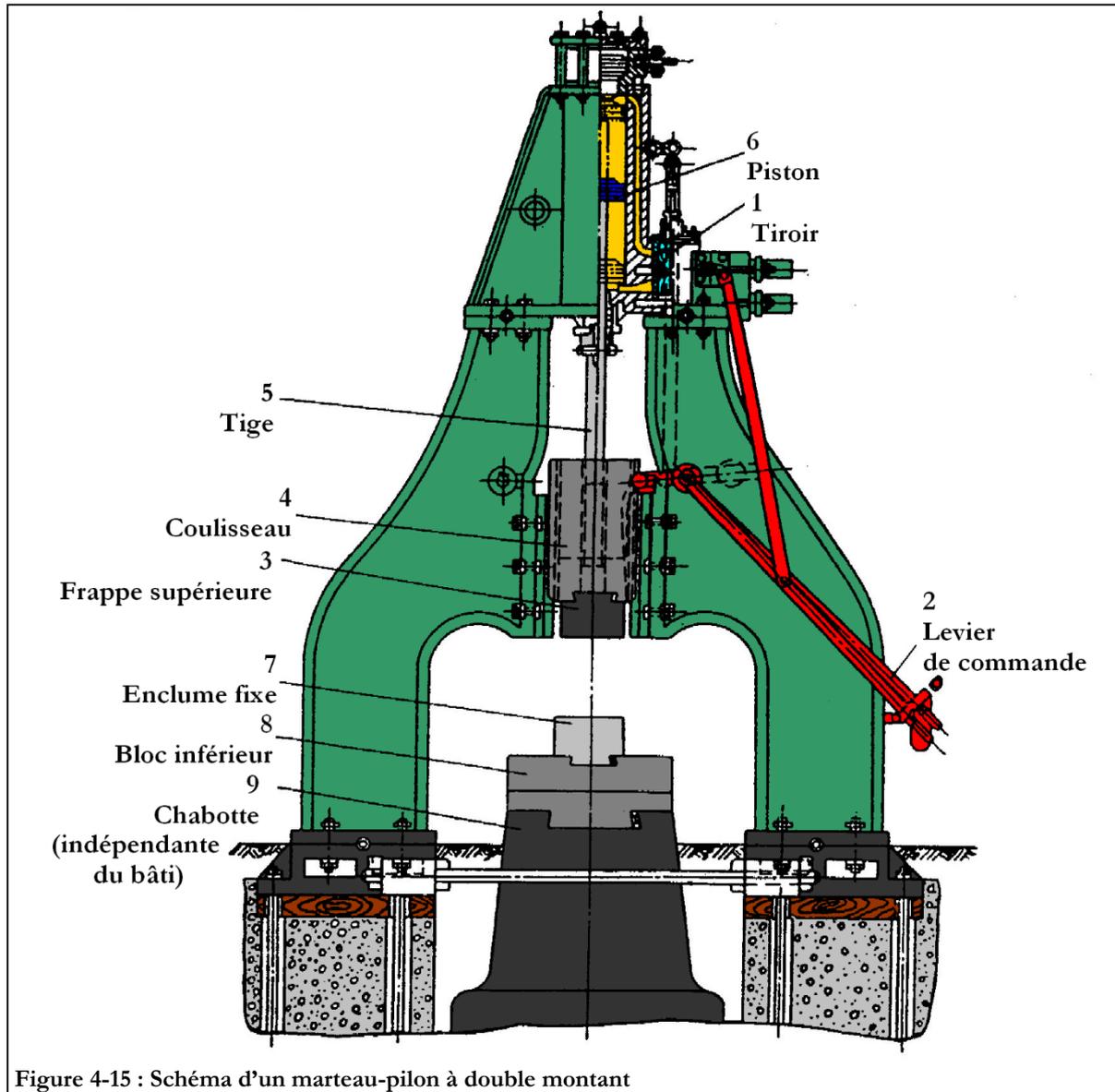


Figure 4-15 : Schéma d'un marteau-pilon à double montant

8.3 Presse hydraulique

Le piston de travail 1 est lié à la traverse supérieure 2, elle-même rattaché par les colonnes 3 à la traverse fixe inférieure 4 placée sur une fondation. Un plongeur mobile 5 accouplé à la traverse mobile 6 se déplace de l'intérieur du cylindre de travail, 7 : frappe supérieure, 8 : enclume

Pour le relevage, le liquide agit sur le plongeur 9 des cylindres de relevage 10.

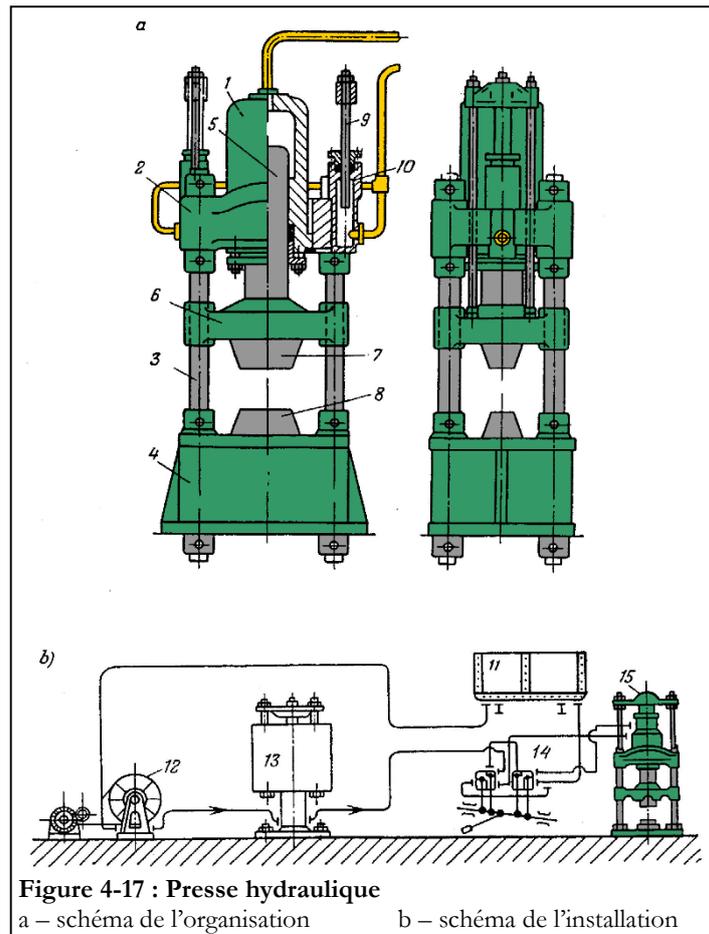
Le liquide de travail peut être de l'eau, une émulsion, ou de l'huile. La pression est de l'ordre de 300 bar.

Détail du circuit hydraulique :

11. Réservoir de fluide, 12. Pompe, 13. Accumulateur : permet d'utiliser des pompes dont le débit est

inférieur au débit de marche. La masse 13 maintient la pression (principe de gazomètre).

14. Distributeur, 15. Presse. Les efforts vont de 300 à 1500 tonnes.



9. Rétreint

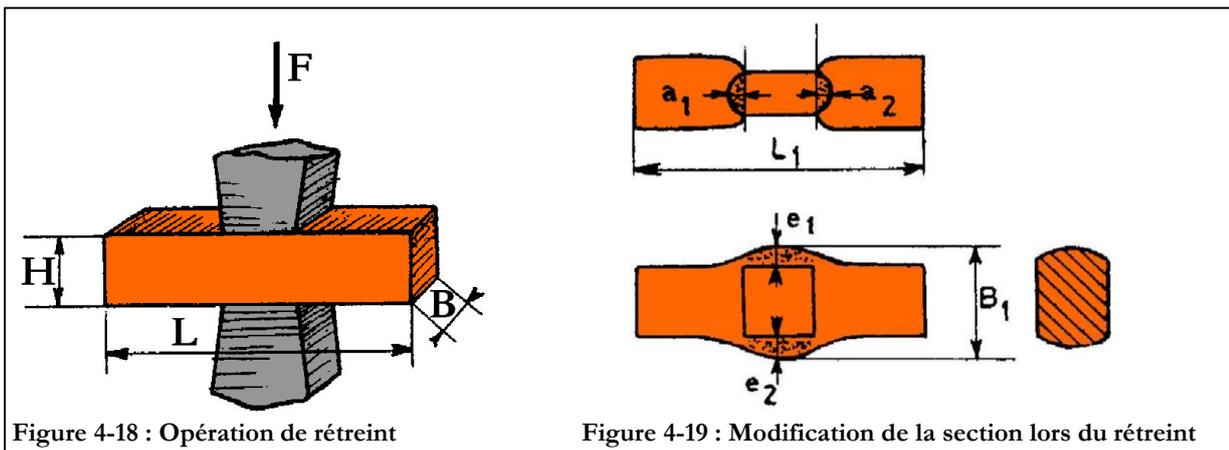
Rétreindre une pièce, c'est amincir sa section.

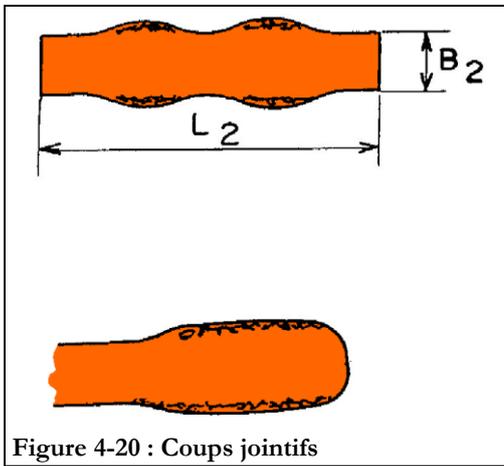
9.1. Rétreint dans une direction

En frappant, on obtient (figure 4-18 et 4-19), à partir d'une longueur L et une largeur B,

Une longueur $L_1 = L + a_1 + a_2 \approx L + 2a$

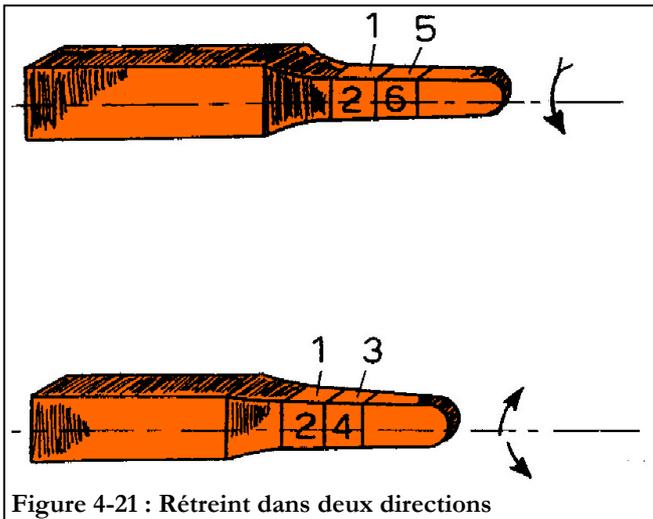
Et une largeur $B_1 = B + e_1 + e_2 \approx B + 2e$





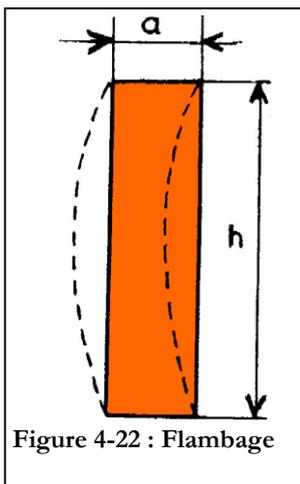
En frappant à coté, on allongera à $L_2 = L + 4a$, mais la largeur restera $B + 2e$. On peut donc allonger la pièce autant que l'on veut. On donne des coups *jointifs* pour assurer la continuité.

9.2 Rétreint dans deux directions



Pour amincir dans les deux directions perpendiculaires à un axe donné, on tourne la barre à 90° autour de cet axe après chaque coup.

9.3 Limitation due au flambage



Si la pièce est trop élancée, elle va flamber. L'expérience montre que tout danger de flambage est évité si la hauteur est limitée par la condition :

$$h \leq 3,5a$$

10. Percage

10.1. Percage de pièces épaisses

On utilise un mandrin de perçage. On chauffe le bloc à percer et

- 1) On enfonce le mandrin jusqu'à mi-épaisseur
- 2) On retourne la pièce et on enfonce à nouveau le mandrin jusqu'à mi-épaisseur.

3) On retourne à nouveau la pièce et on cisaille le noyau restant par un dernier coup de mandrin.

Si l'on veut calibrer le trou, on y enfonce un tonneau à calibrer.

Attention : ce procédé ne peut être utilisé que si le diamètre D du mandrin vérifie : $D \leq H/2$

Où H est l'épaisseur de la pièce. Dans le cas contraire, le noyau ne sera pas cisailé mais simplement refoulé.

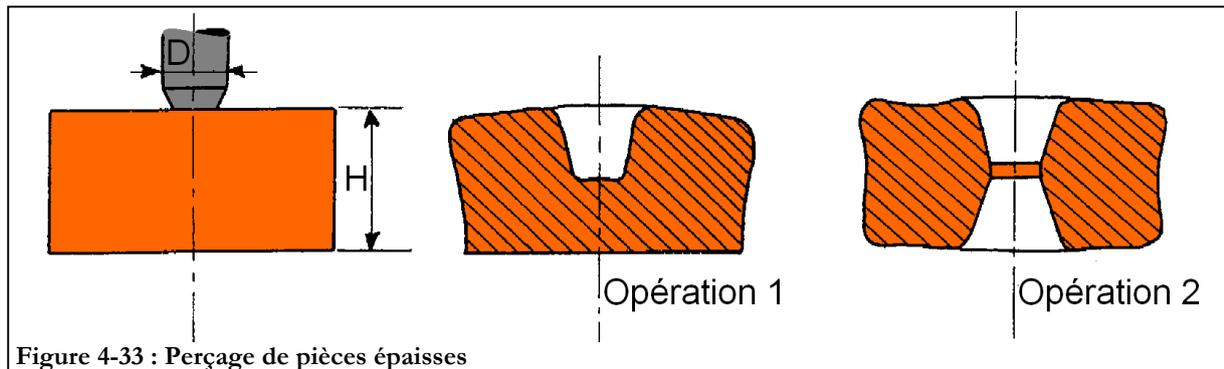


Figure 4-33 : Perçage de pièces épaisses

10.2. Perçage des pièces minces

Si $D > H/2$, on place la pièce sur une bague dont le diamètre intérieur est celui du trou à réaliser et on frappe avec un perceur en dépouille.

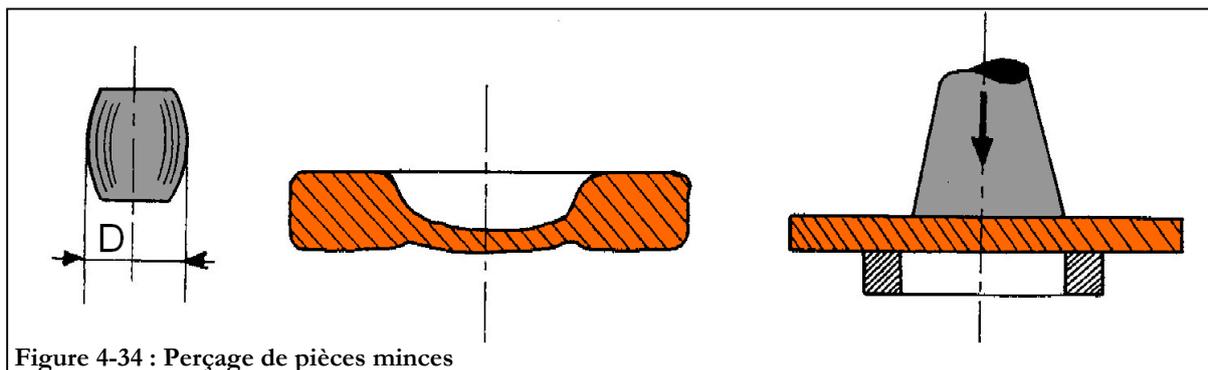


Figure 4-34 : Perçage de pièces minces

11. Laminage (Bigornage)

Le matériau est déformé par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés laminoirs. Le laminage peut s'effectuer à froid ou à chaud. Les laminoirs sont souvent utilisés les uns à la suite des autres afin de réduire progressivement l'épaisseur des profilés. La plupart des tôles plates brutes sont obtenues par laminage.

A partir d'une pièce percée, on peut obtenir un anneau mince par *bigornage*.

Ce procédé consiste à frapper la pièce posée sur un cylindre, en la faisant tourner entre deux coups.

Ce procédé nécessite un opérateur expérimenté. Aussi, chaque fois que le diamètre intérieur du trou le permet, on tend à remplacer par un *laminage circulaire*, consistant à faire tourner l'anneau entre deux cylindres (figure 4-35). Comme application de ce procédé, citons entre autres les bandages de roues de chemin de fer.

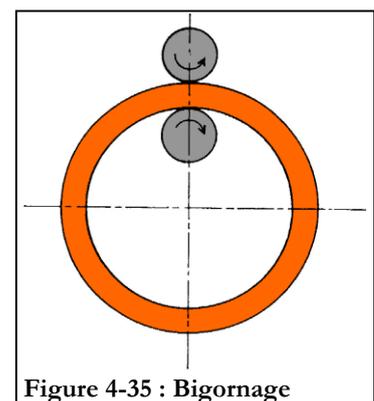


Figure 4-35 : Bigornage

12. Tranchage

En *maréchalerie*, on procédait comme suit. La *tranche* inférieure était placée sur l'enclume. La tranche supérieure était tenue par l'aide du maréchal ferrant. On frappait alors sur la tranche supérieure.

A la machine, on place la pièce sur l'enclume, et on travaille avec une seule tranche en deux fois, avec retournement. De toute manière, les lèvres sont *en biseau* et la coupure est *déportée*, car un des deux côtés a moins de matière et donc moins de résistance au refoulement.

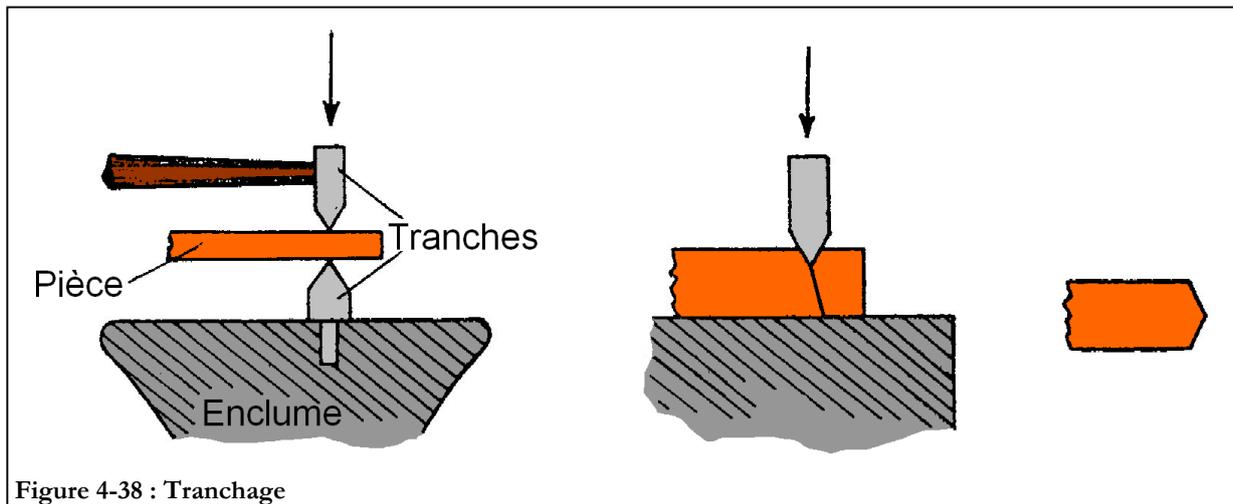


Figure 4-38 : Tranchage

13. Estampage

L'estampage est le forgeage mécanique des aciers, tandis que le matriçage est le forgeage mécanique des métaux non ferreux.

Principe :

Un lopin de métal chauffé et calibré (avec des dimensions précises) se déforme pour remplir les deux demi-empreintes de deux matrices appliquées l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une série de chocs.

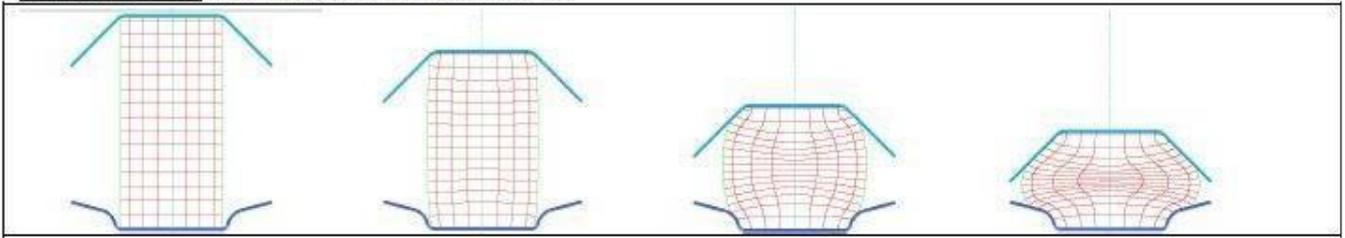
L'estampage est le forgeage en matrice. Il ne s'applique qu'aux *grandes séries*, car la fabrication des estampes est coûteuse. On estampe d'habitude entre 700 et 1000°C. Il est donc nécessaire, dans le dessin des matrices, de tenir compte du retrait après forgeage.

Matériau	Température de mise en forme à chaud	
Alliages légers	360-490°C	} matriçage
Aluminium Pur	450-490°C	
Magnésium pur	350-430°C	
Cuivre pur	800-880°C	} estampage
Nickel Pur	1110-1160°C	
Acier	1050-1250°C	

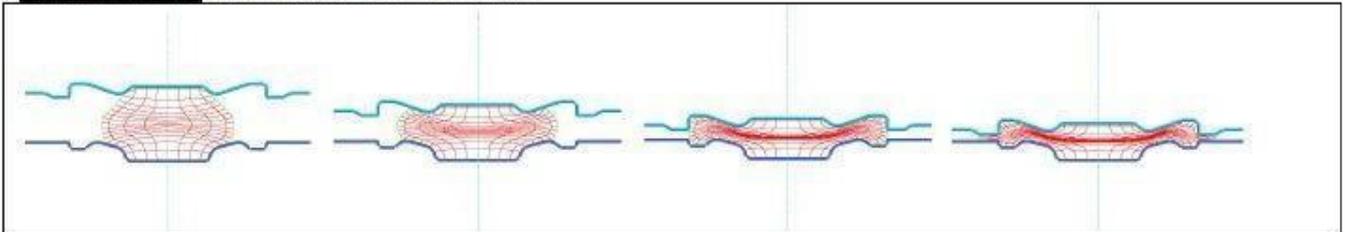
Il faut *préparer* les pièces en plaçant d'abord la matière au bon endroit (figure 4-43 1). Si la forme finale est allongée, on ne peut partir d'un bloc carré, car il se dilatera aussi bien en largeur qu'en longueur,

créant ainsi des bavures. Or, les bavures, de faible épaisseur, réduite, ne peuvent plus être forgées. La pièce doit donc d'abord être mise sous forme allongée.

Outillage 1 : réalisation d'une ébauche



Outillage 2 : réalisation de la finition



Les bavures qui ne peuvent être éliminées totalement, rendent la poursuite du forgeage impossible. Pour s'en débarrasser, on crée un dispositif permettant de les loger (figure 4- 48). Il s'agit d'une gouttière. De cette façon, la bavure n'est forgée que sur une petite largeur. Elle peut donc fuir dans la gouttière.

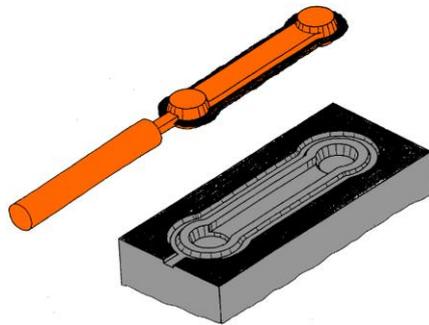


Figure 4-48 : Exemple de gouttière pour l'estampage d'une bielle

La bielle est une bonne illustration, la figure 4-49 représente une matrice complète permettant à la fois le formage préliminaire et l'estampage final.

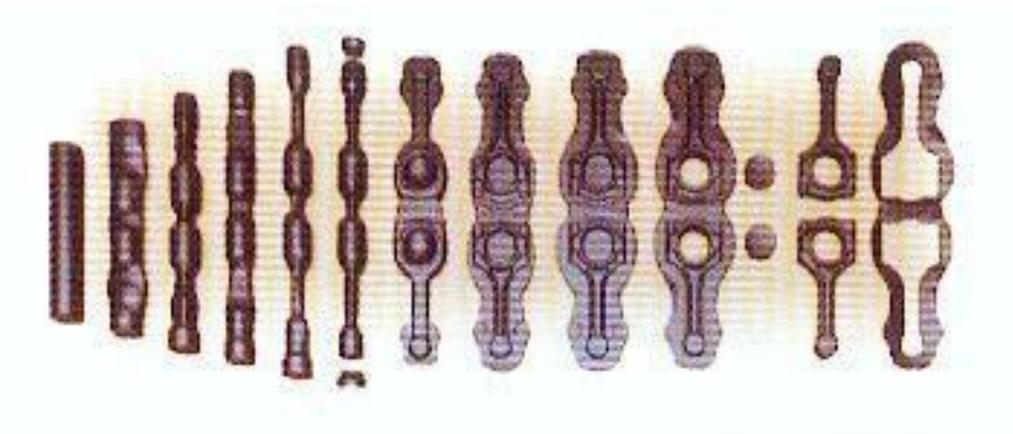


Figure 4-49 : Etapes d'un estampage

Estampage à froid

L'estampage à froid permet de dresser des surfaces ou de leur imprimer une gravure (pièces de monnaie). On peut travailler en estampe ouverte (figure 4-59), permettant une bavure, ou en estampe fermée.



Exemples de pièces et de matrices

14. Extrusion

14.1 Extrusion à chaud (ou filage)

Principe de l'extrusion (appelée aussi filage pour les métaux) :

Un matériau chauffé et compressé est contraint de traverser une filière ayant la section de la pièce à obtenir. Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long (barre, tube, profilé, tôle...).

Avantages :

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Bons états de surface ;
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes. Inconvénients :
- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions ».

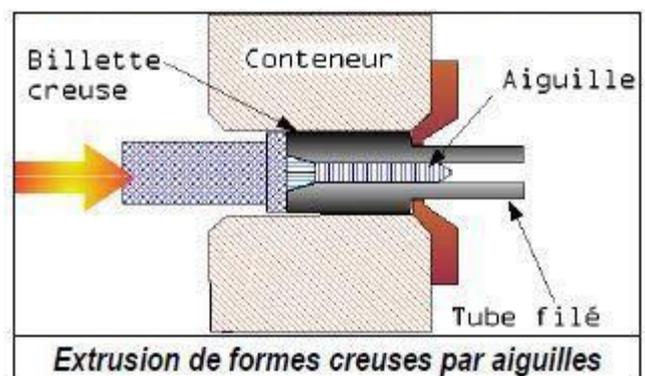
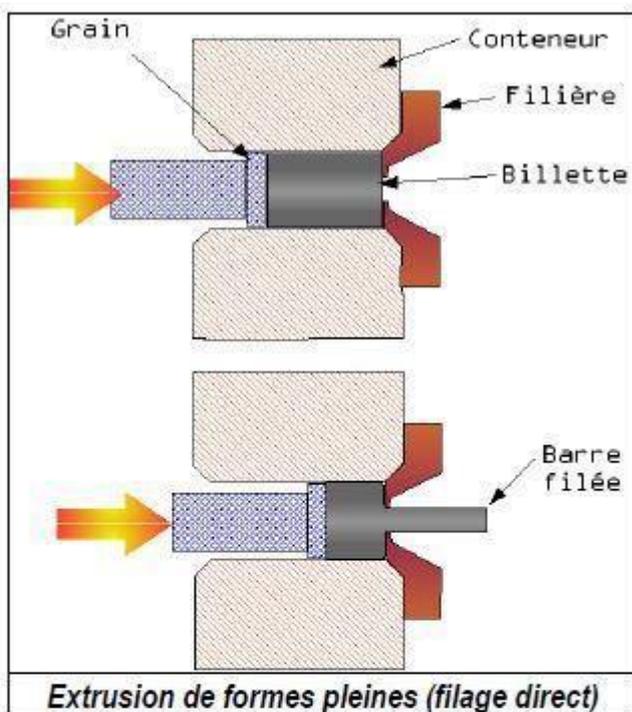


Figure 4-52 : Exemples de produits obtenus par extrusion