

Chapitre 2: Procédés de formage par déformation

2.1. NOTIONS

Depuis longtemps on a connu la notion de façonnage des matériaux par les divers procédés existants dans l'industrie, à savoir les procédés de mise en forme par ou sans enlèvement de la matière.

A cet fin, notre chapitre ici vise l'étude des procédés de formage regroupant toutes les techniques de mise en forme des matériaux à l'état solide par déformation plastique.

On sait que les matériaux, ayant été soumis à des efforts, se comportent différemment en fonction de l'intensité de ces efforts. En résumé, le matériau passe par trois périodes :

La première période est la période élastique ou de résistance à la déformation des matériaux. Si on relâche les forces appliquées avant d'atteindre la limite $(R_e)t$, le matériau reprend sa forme initiale : *c'est la limite élastique*.

La deuxième période quand elle est la période de déformation permanente ou période de mise en forme des matériaux (qui nous intéresse). Le matériau se déforme, mais ne rompt pas et gardera la déformation même si les forces appliquées sont supprimées.

La troisième période est la période dite de striction ou de décohésion structurale localisée entraînant la rupture de l'éprouvette.

Plusieurs techniques qui sont à l'ordre de ce travail, peuvent être classées dans deux catégories différentes.

La première catégorie concerne celles s'effectuant à chaud ; ici la température de travail devra être supérieure à la température ambiante et inférieure à celle de fusion du matériau travaillé. Elle se prête bien aux pièces massives.

La deuxième catégorie concerne celles s'effectuant à froid, c'est-à-dire à la température ambiante. Cette technique se prête bien aux pièces minces qu'aux massives.

La déformation est une opération au cours de laquelle on modifie, par chocs ou par pression, la forme initiale d'un produit du commerce.

La réalisation de cette opération implique :

- la création de **chocs** (marteaux-pilons,...) ou de **pressions** (presses, laminoirs),
- un outillage de **mise en forme** (matrices, filières...).

L'outillage est conçu pour que la pièce obtenue soit la reproduction des formes de cet outillage (matrices) ou l'obtention d'un profil caractéristique constant (laminoirs, filières).

- un **choix de la pièce initiale** : lopin scié ou cisailé dans une barre, plaque de tôle, lingot, tube,...etc.

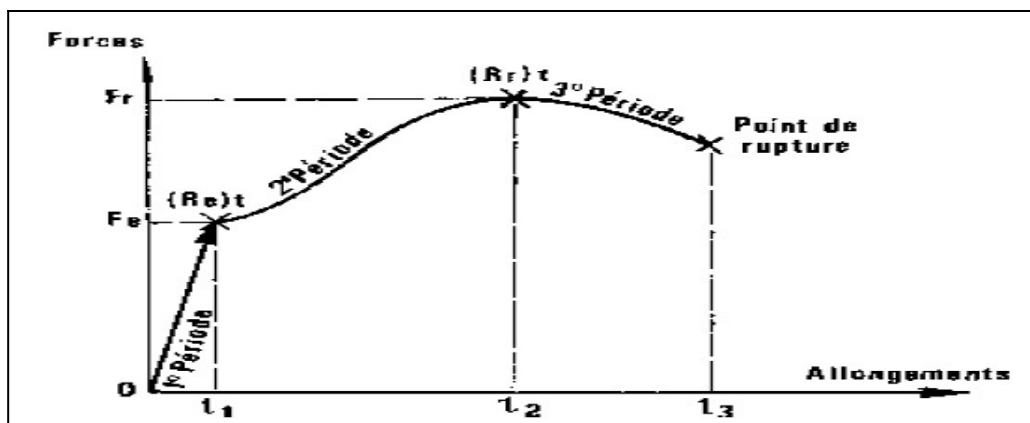


Fig.2.1 : Périodes caractérisant un matériau après sollicitation

2.2. OBJECTIFS

- L'objectif principal vise à obtenir des éléments aux formes complexes, définitives ou approchantes en réalisant une économie :
 - de matière, par absence de pertes dues aux procédés de transformation ;
 - de temps de production par rapport à d'autres procédés.
- Des conséquences (amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau), liées aux procédés d'obtention par déformation. :

2.3. DIFFERENTS PROCÉDES

2.3.1. Le forgeage

On entend par forgeage l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une pièce mécanique en appliquant une force importante sur un matériau, à froid ou à chaud, afin de le contraindre à épouser la forme voulue. Parmi les procédés de forge existants, il y a :

- **Forgeage libre**
- **Forgeage à chaud**
 - le forgeage par estampage (forgeage de métaux ferreux) ;
 - le forgeage par matriçage (forgeage de métaux non ferreux).
- **Forgeage à froid**

Les machines de travail : Les machines utilisées sont assez variées avec des vitesses de frappe très différentes suivant le cas. On trouve :

- Des moutons,
- Des marteaux-pilons,
- Des presses hydrauliques ou mécaniques.

2.3.1.1. Forgeage libre

a) Principe du forgeage libre :

Sous l'action d'une forte pression ou d'une succession de chocs, un bloc de métal chauffé (800 à 1200°C) se déforme plastiquement vers les surfaces restées libres.

L'opération peut s'effectuer avec un outillage manuel ou à l'aide d'un marteau-pilon ou d'une presse hydraulique. La forge libre permet d'obtenir des ébauches ou des pièces brutes, et n'est pas adaptée au travail en série.

❖ **Avantages :**

- Pas d'outillage spécialisé selon la pièce à obtenir ;
- Les pièces forgées ont une résistance mécanique supérieure aux mêmes pièces usinées, du fait du fibrage de la pièce consécutif au forgeage.

❖ **Inconvénients :**

- Nécessite beaucoup d'énergie (métal chauffé) ;
- La précision est médiocre.

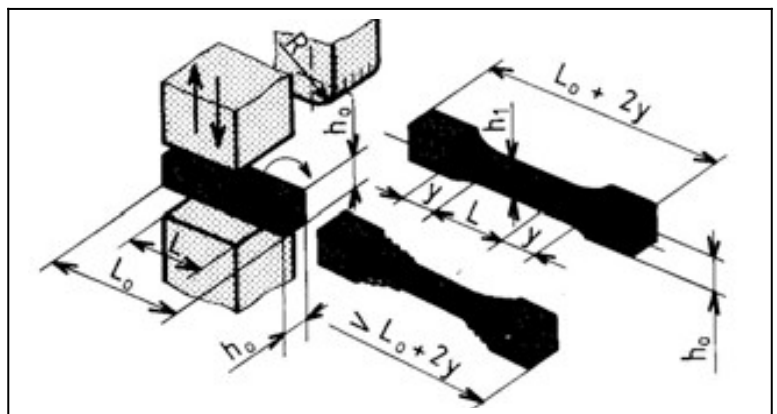


Fig2.2 : (a) Forgeage libre

b) Différentes techniques de forgeage libre : On peut citer ici plusieurs techniques : Etirage, estampage, refoulement, degorgeage, poinçonnage, mandrinage, bigornage, retreinte et étirage avec ou sans mandrin, élargissement, mise à longueur (voir TD).

c) Mode d'action des materiels utilises :

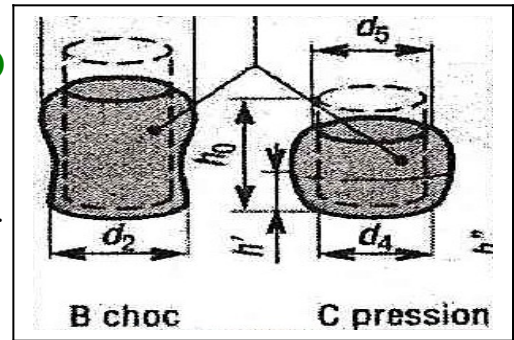
On distingue deux types d'engins

- Engins travaillant par choc :
ou un des **tas** est anime d'une vitesse $V \geq 6\text{m/s}$
au moment ou il frappe la piece (marteaux, moutons).

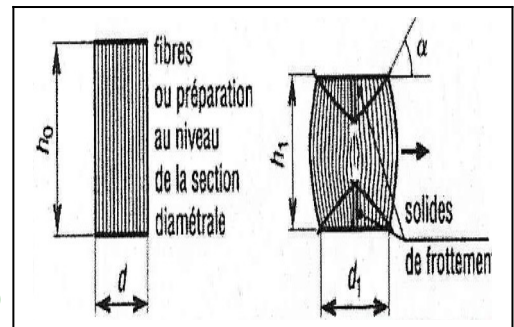
- Engins travaillant par pression :
un coulisseau (presses mecaniques), un piston (presses hydrauliques), portant le tas de deformation, se deplacant a une vitesse infeieure a la precedente (frequemment $V \leq 1\text{m/s}$).

d) Resultats obtenus : Par comparaison des formes et des diametres entre les deux types d'action, on remarque que le choc a un effet plus superficiel que la pression qui prolonge l'action jusqu'au coeur de la piece.

(b)



(c)



e) Effort de deformation (presses) : Cette situation se traduit par une augmentation de la resistance que nous devons vaincre pour deformer le metal. L'effort a appliquer pour continuer le mouvement ou le creer croit. On l'exprime par le rapport des deux parametres h_1 et d_1 , qui resume la situation. On le designe par seuil de plasticite : $k = h_1/d_1$. Connaissant **la surface finale** sur laquelle on l'applique et la temperature du metal, il est facile de situer la presse capable de fournir l'effort : $F = S \cdot p$

NB : On doit noter que les efforts a mettre en jeu lors de la frappe ont un rapport de 2,5 en fonction de la machine utilisee.

$$F_{Choc} \approx 2,5 \cdot F_{Pression}$$

f) Energie necessaire (presses) :

c'est le produit du volume V deplace par la resistance specifique a la deformation p .

$$E = V \cdot p \cdot \text{Log } h_0/h_1 \text{ (fig 2b)}$$

Ce resultat peut etre exprime par excès, en utilisant la relation pratique $E = F \cdot C$ ou F est la force precedente. C le deplacement (engendre) de h_0 a h_1 .

2.3.1.2. Forgeage a chaud**(Estampage et matriçage)**

On appelle procede d'**estampage** le forgeage mecanique des metaux ferreux (aciers), tandis que **matriçage** signifie le forgeage mecanique des metaux non ferreux.

a) Principe :

Un lopin de metal chauffe (etat pateux) et calibre (avec des dimensions precises) se deforme pour remplir les deux demi- empreintes de deux blocs appeles matrices appliquees l'une contre l'autre sous l'action d'une forte pression ou d'une serie de chocs (**fluage**).

L'estampage et le matriçage sont adaptes a une production en serie.

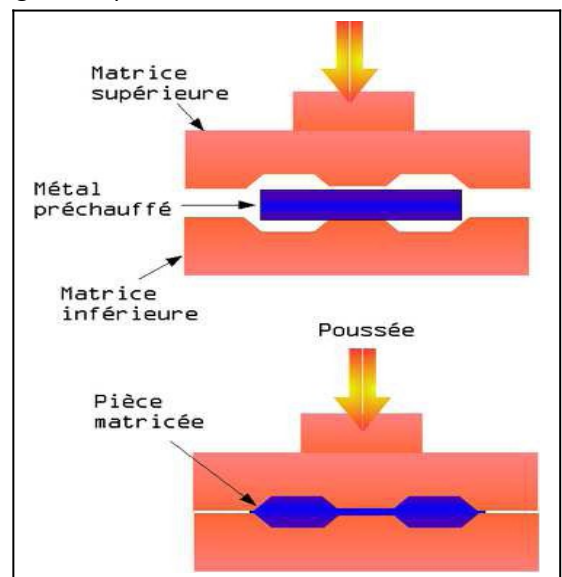


Fig2.3. Estampage ou matriçage

❖ **Avantages :**

Les mêmes que pour le forgeage libre, avec plus de rapidité et une meilleure précision. En plus le succès du matriçage vient de trois avantages majeurs :

- Propriétés métallurgiques : excellent compromis entre résistance, élasticité, rupture, fatigue, corrosion, résilience,
- Gain sur le rapport tenue mécanique / masse de la pièce,
- Réduction des coûts des usinages.

❖ **Inconvénients :**

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud)
- Prix de revient élevé des matrices rapidement « usées ».

b) Methodes d'estampage : Selon leur poids, leur forme, les engins dont on dispose ; les pièces peuvent être estampées : une par une, deux par deux placées bout à bout, deux par deux placées côte à côte, en chapelet.

NB : En forge par estampage, il est nécessaire de concevoir une série de matrices (pour plusieurs ébauches) qui vont permettre de réaliser le brut désiré.

On évite ainsi :

- Le manque de métal dans certaines parties de la pièce (figure.4) avec un surplus exagéré dans les autres ;
- Une usure prématurée des outillages dans les zones les plus sollicitées ;
- Les défauts tels que les repliures et criques, ainsi qu'une mauvaise répartition des fibres.

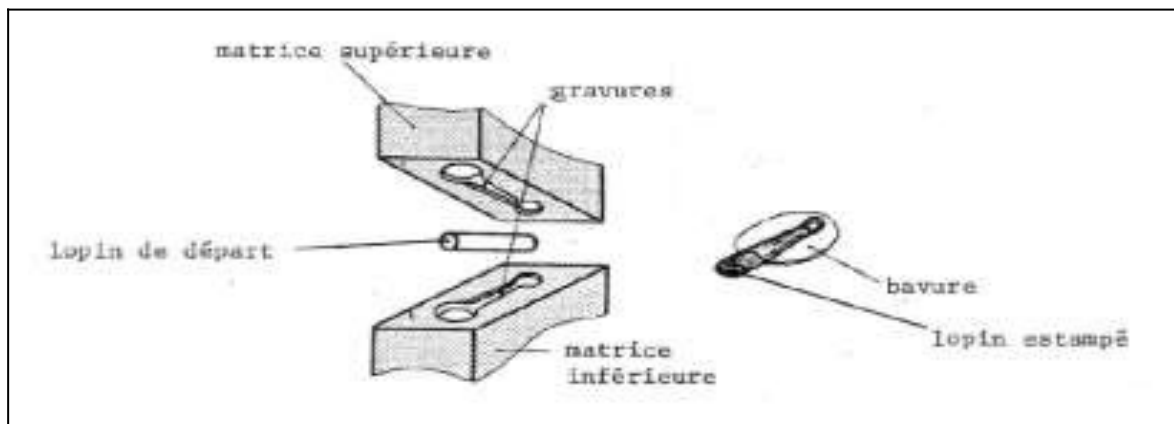


Fig.2.4 :schema de principe

c) Etapes successives de formage : Cambrage, ébauche, finition, ébavurage.

Cependant et selon l'engin utilisé, on peut retrouver sur la même matrice les formes suivantes:

Roulage, étirage, renvoi, cambrage accompagnées des gravures d'ébauche et de finition

Remarque : la précision obtenue en forge libre est de 5mm ; alors qu'elle atteint en estampage et matriçage les valeurs de 1 à 2mm.

Le travail se fait à chaud, le prix élevé des outillages implique une utilisation de ce procédé pour des séries moyennes à des séries grandes (1000 pièces mini).

Pour les Matériaux forgeables seuls les matériaux ayant une certaine ductilité à chaud ce qui n'est pas le cas des fontes.

Matériau	Acier	Laiton	Cupro Aluminium	Alliage d'aluminium
Température de forgeage	1050°C	750°C	850°C	470°C

Tableau 1 : Température de forgeage de quelque matériaux

2.3.1.3. Forgeage a froid

On désigne ici par forgeage a froid les deux cas pouvant se présenter comme suit :

- ❖ **Forgeage ou frappe a froid** : s'exécute sur des machines a grande vitesse (70 a 150 pieces / minute), avec la possibilite de produire, des pièces ayant ($\varnothing$ maxi= 140mm ; h maxi =1200 ; e = 0.5 a 15mm), a partir de matériaux en fils.
- ❖ **Filage ou extrusion** : la pression exercée par un poinçon sur un lopin de métal oblige celui-ci a s'écouler a travers l'orifice d'une matrice.

On peut avoir :

- **Filage direct** : le metal s'écoule dans le sens de deplacement du poinçon ;
- **Filage inverse** : le metal s'écoule dans le sens inverse du deplacement du poinçon dans l'espace laissé libre entre le poinçon et la matrice. Cette technique permet d'obtenir en continu un produit pouvant être très long ; tels que : (barre, tube, profilé, tôle...).

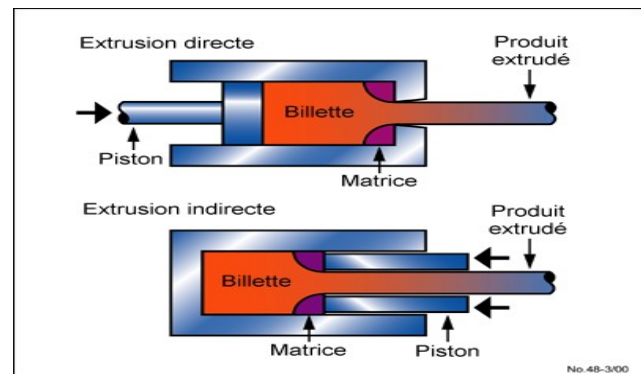


Fig 2.5. Travail et types d'extrusion

- Les pressions exercées par le poinçon étant très importantes (200 daN/mm^2), les presses doivent être puissantes et rapides.
- Nécessite d'installation de traitements thermiques (suppression de l'écrouissage).
- Les outillages doivent posséder des caractéristiques mécaniques élevées (acier rapide traité Z35 CND 05).

○ **Avantages :**

- Meilleure précision que le matriçage ou l'estampage ;
- Excellents IT et états de surface : $T = h9$ ou $h10$; $Ra = 1,6$ à $3,2 \mu\text{m}$
- Sections des profilés pouvant être creux et très complexes.

○ **Inconvénients :**

- Nécessite beaucoup d'énergie (travail à chaud) ;
- Formes limitées à des « extrusions ».

❖ **Tréfilage**

On tire sur un fil pour l'obliger à traverser une filière de section plus faible. Le **tréfilage** est la réduction de la section d'un fil en métal par traction mécanique sur une *machine à tréfiler*. Les usines spécialisées dans le tréfilage sont appelées des **tréfileries**.

L'écrouissage y est important et nécessite un traitement thermique appelé **patentage** (type de recuit pour les faibles sections) évitant au fil d'être trop cassant et améliorant sa plasticité.

2.3.2. Le découpage

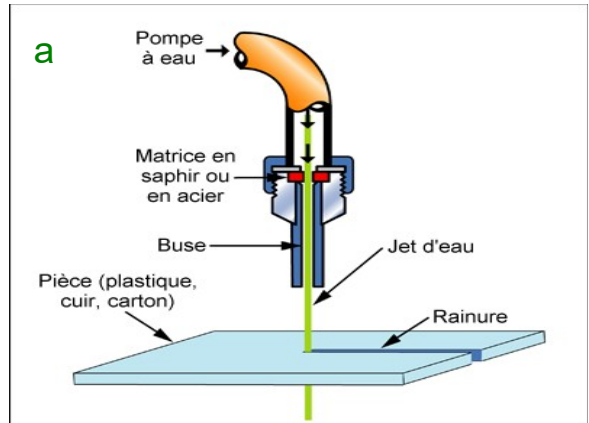
Découper des matériaux en feuille, d'épaisseur plus ou moins importante est souvent le préalable à la réalisation d'une pièce. On peut citer plusieurs techniques (voir fig 4):

- a) Découpe par jet d'eau,
c) l'Electroérosion par fil,

- b) D
d) l'O

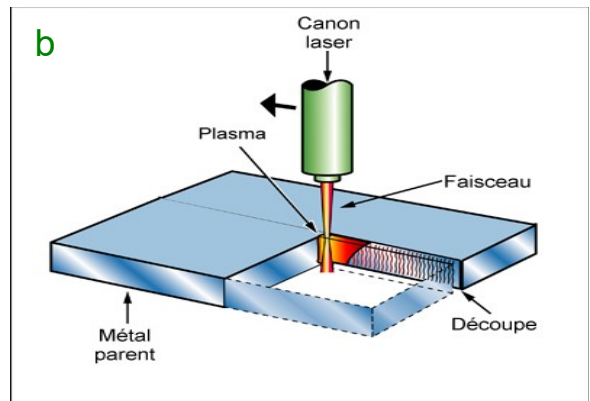
2.3.2.1. Découpe par jet d'eau

A l'aide d'une buse on projette un fin jet d'eau à très haute pression. La sortie de la buse se fait alors autour de la vitesse de 900m/s. L'eau peut être chargée avec des abrasifs. Ce procédé permet la découpe de matériaux épais (>100 mm) et de composites. Il n'y a pas de chaleur et d'échauffement, pas de gaz vapeurs toxiques, pas ou peu de déformations et pas de limites dans la forme des coupes. Par contre on ne peut découper des corps creux dans de bonnes conditions, la précision est moyenne, délaminage possible, humidité ambiante, usure des buses. Le pilotage de la buse peut être manuel ou à commande numérique



2.3.2.2. Découpe au laser

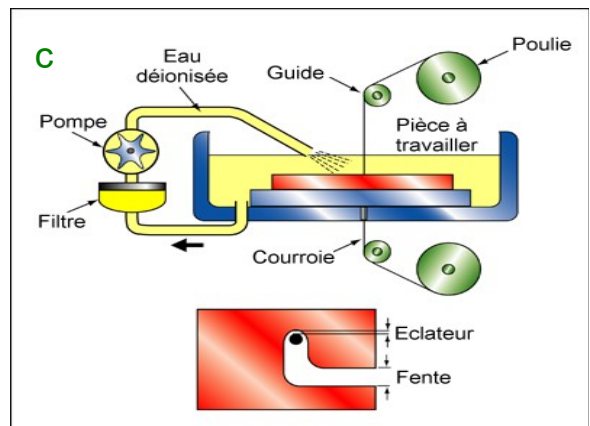
On utilise dans ce cas l'énergie thermique d'un faisceau laser. Ce procédé permet une grande vitesse d'avance et un travail précis, la largeur de saignée est réduite, il n'y a pas d'usure et peu de limites dans les formes découpées, et il y a peu de déformations. Certains métaux réfléchissants ne peuvent être découpés (Cu, Au, ..). On ne peut couper les corps creux et multicouches. Il y a émission de gaz toxiques et la matière peut être thermiquement affectée. Le procédé reste cher par son installation. Le pilotage peut être manuel ou à commande numérique



2.3.2.3. l'Electroérosion par fil

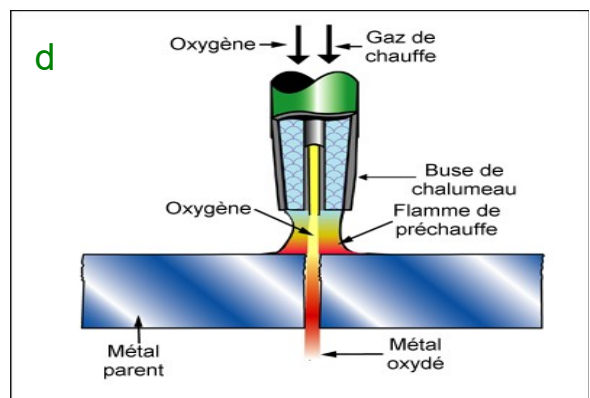
On utilise la microfusion de la matière due à l'arc électrique se produisant entre le fil et la matière. On peut réaliser des coupes très épaisses (>400 mm), avec des dépouilles (30°), avec une grande précision (5 µm).

La découpe de nids d'abeille est possible. Par contre le procédé est lent, les courses limitées et le matériau doit être conducteur



2.3.2.4. l'Oxycoupage :

Son principe se présente par un jet d'oxygène pur sur un métal préalablement localement chauffé à sa température de combustion ; L'utilisation de l'action d'un jet d'oxygène, le plus souvent, sur de l'acier chauffé permet



des découpes simples sur des tôles pouvant aller jusqu'à 6 m d'épaisseur

Fig.2.6 : Procédés de Découpes

2.3.3. Le pliage (cambrage)

2.3.3.1 Pliage

a) Principe : Sur une portion de tôle appelée **flan** on exerce à l'aide d'un outil de forme variée un effort sur une pièce reposant sur quelques appuis. Cet effort déforme le flan dans le domaine plastique (Fig2.7).

La mise en forme des éléments s'effectue par déformations successives sans modification de l'épaisseur du produit brut : **tôle, profilés**, après découpage préliminaire.

Le domaine d'application est vaste et trouve toute son application dans des secteurs comme l'électroménager.

b) Classification :

Chaque technique de mise en forme par pliage relève des outillages utilisés. Le tableau suivant résume les différentes techniques de pliage.

Technique	outillage
Pliage	Dispositif serre-tôle et tablier (sans frappe).
	Système poinçon et ve (avec frappe)
Profilage	Couple de galets de forme complémentaire (sans frappe).
Roulage	Couple de rouleaux (sans frappe)

Tableau2.7 : différentes Techniques de pliage

- **Sur machine à plier (plieuse) :** sans frappe et après découpage de la pièce.
- **Sur presse plieuse :** avec frappe et après découpage de la pièce.
- **Sur presse avec outillages spéciaux.**

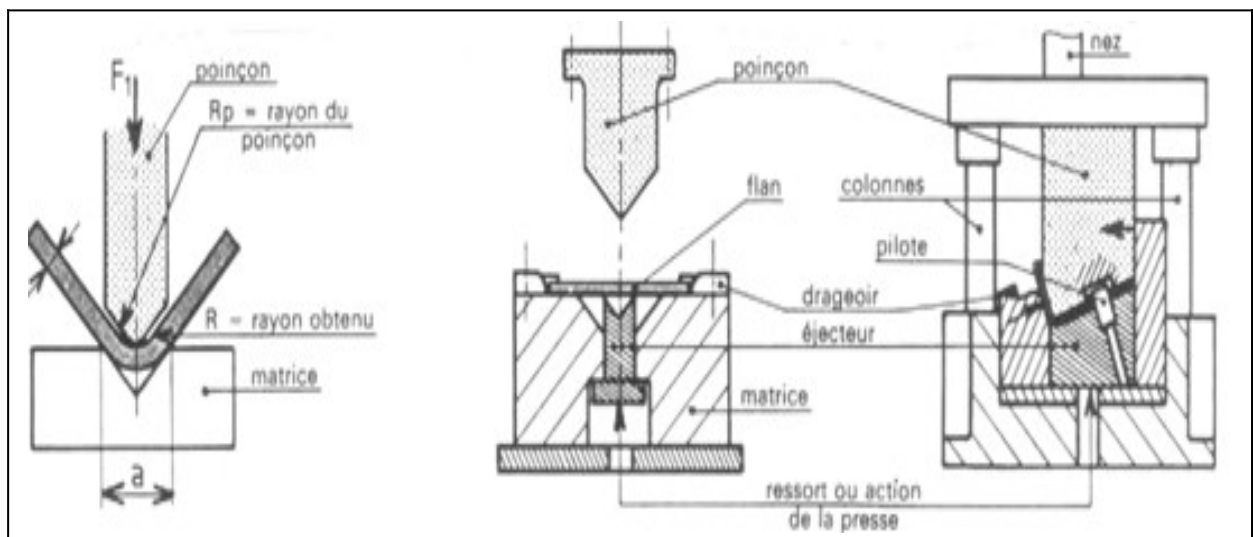


Fig.2.7 : Outillages des différentes Techniques de pliage

2.3.3.2. Profilage

a) Principe :

Une tôle plane (feuillard), introduite entre les galets tournants d'une machine à profiler (ou profileuse), subit des déformations progressives qui l'amènent à la forme finale désirée, sans que soit modifiée son épaisseur initiale. Ce procédé est adapté aux grandes séries.

b) Avantages :

- Longueur de profilé non limitée (procédé de formage en continu).
- Procédé rapide et productif (possibilité de découpe en vol).

2.3.4. Formage a froid (Laminage)

Le formage a froid se dit aux procédés d'obtention des éléments par déformation du matériau (métaux) qui relève du laminage plus que du forgeage (déformation par pression et non par choc).

Le **laminage** est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme du métal ou tout autre matériau. Cette déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés appelés **laminoir** (Barres de section constante, de forme simple).

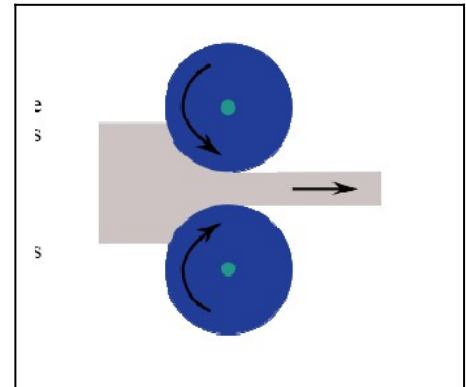


Fig2.8 : Laminage

On fait passer un profilé entre des rouleaux qui vont diminuer sa section, l'entraînement du profilé se fait par la rotation des rouleaux en sens inverse. Il permet également la production de barres profilés (produits longs).

Il existe de nombreux types de laminoirs : laminoir à produits plats ; laminoir à produits longs ; laminoirs à fils ; laminoirs à rouleaux coniques : pour le formage des roues pour le chemin de fer ; laminoir à pâtes alimentaires : pour toutes les nouilles plates y compris les lasagnes ; laminoir de boulangerie/pâtisserie : pour les pâtes à tartes, la pâte feuilletée et à croissants. Il est plus facile de déformer le matériau s'il :

- est ductile
- a une limite élastique faible

2.3.5. Emboutissage

Définition : L'emboutissage est un mode de déformation qui permet de transformer une tôle plane (flan ou bande) en un objet de forme creuse (sections régulières ou non).

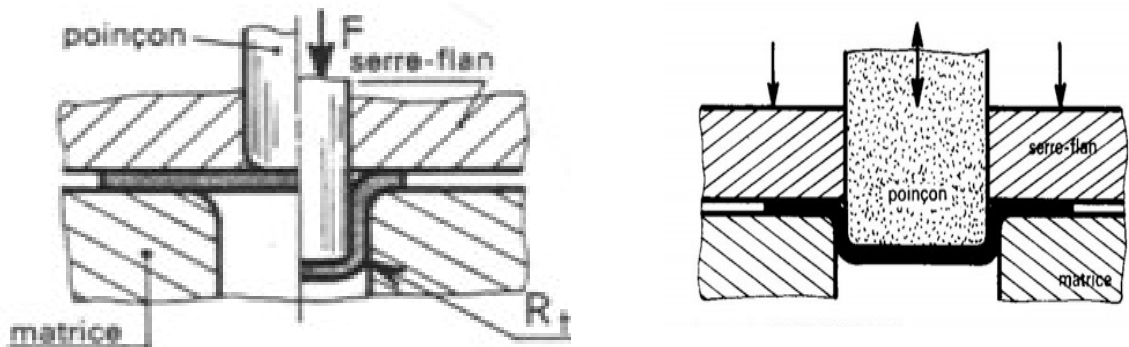


Fig 2.9. Procédé d'emboutissage

L'emboutissage permet d'obtenir des pièces de formes déterminées, sans recourir à la fusion. L'opération peut se faire à froid ou à chaud, manuellement ou par l'intermédiaire de machines (presse à emboutir). La pièce est formée à l'aide d'estampes (poinçon et matrices) adéquates, entre lesquelles est comprimée une feuille de métal.

L'application type est la réalisation des pièces de carrosserie automobile.

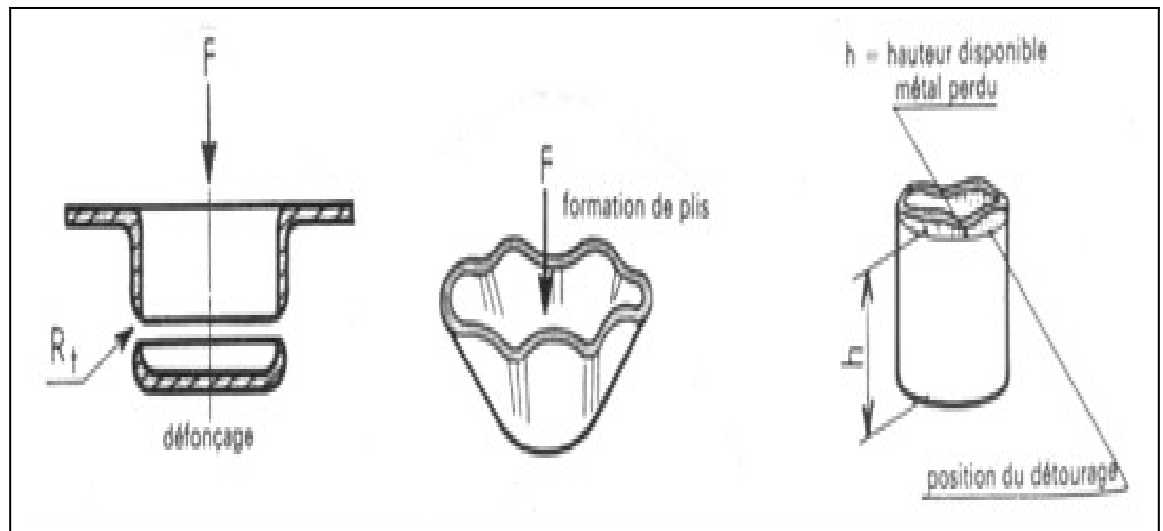


Fig 2.10 :Exemple d'emboutissage

2.3.6. Cintrage

Le cintrage est la déformation à froid d'un tube ou d'une barre, suivant un rayon et un angle donnés (opération effectuée avec une cintrreuse).

On peut obtenir un cintrage approximatif en effectuant plusieurs petits pliages rapprochés les uns des autres.

3.7. Le poinçonnage

L'image la plus simple est donnée par la perforatrice des écoliers.

La forme du poinçon définit la forme des pièces que l'on peut obtenir et il n'y a guère de limite à sa forme.

Le découpage est effectué par un poinçon ayant la forme de l'ajour(trou) à découper.

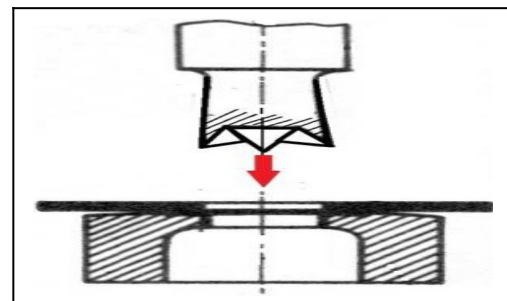


Fig2. 11. Procédé de poinçonnage

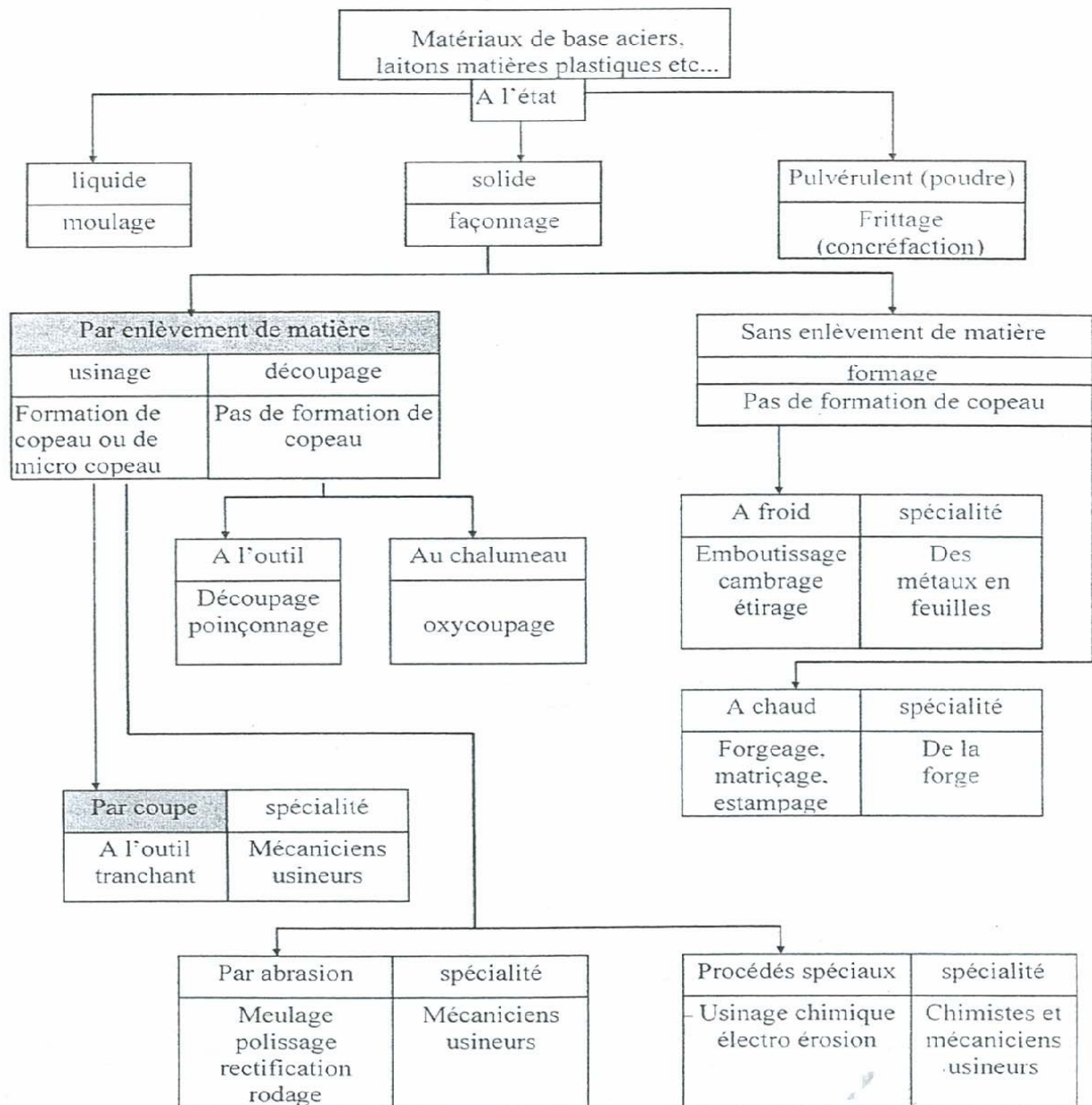


Fig2. 12. Résumé récapitulatif